

# CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE HORMIGONES ELABORADOS CON ÁRIDOS Y RESIDUOS DE ÁRIDOS DE CANARIAS

**NATALIA RODRÍGUEZ BRITO**

La Laguna, 2017

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

# CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE HORMIGONES ELABORADOS CON ÁRIDOS Y RESIDUOS DE ÁRIDOS DE CANARIAS

Memoria para optar al grado de  
DOCTOR EN QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

NATALIA RODRÍGUEZ BRITO

La Laguna, 2017

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

09/06/2017 11:30:19

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Memoria para optar al grado de  
DOCTOR EN QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE  
HORMIGONES ELABORADOS CON ÁRIDOS Y  
RESIDUOS DE ÁRIDOS DE CANARIAS

Realizada por  
**NATALIA RODRÍGUEZ BRITO**

En el  
**Departamento de Química, Universidad de La Laguna, España**

Bajo la dirección de

**Dr. Ricardo Manuel Souto Suárez**, Universidad de La Laguna

**Dra. María del Carmen Andrade Perdrix**, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid

**Dr. Juan José Santana Rodríguez**, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

La Laguna, 2017

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## AGRADECIMIENTOS

Es el momento de escoger las palabras, no sólo para reconocer hechos sino también para expresar sentimientos, y corresponder de la mejor forma posible, mi más profundo agradecimiento a la ayuda prestada.

Gracias de corazón, a mis directores de tesis, Dr. Ricardo Manuel Souto Suárez, Dra. María del Carmen Andrade Perdrix y Dr. Juan José Santana Rodríguez, por abrirme las puertas del departamento y de su grupo, por brindarme durante éstos años sus visiones, criterios y enseñanzas, y por vuestra gran dedicación, paciencia, empuje y motivación, que me han ayudado a hacer posible este desafío, que en principio se me planteó casi titánico. Ha sido un privilegio para mi haber conocido y contado con la guía de estos grandes investigadores, con los que espero seguir colaborando.

Gracias a la Consejería de Infraestructura y Transporte, por el fomento de la investigación y más concretamente al Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción, por los recursos que me han sido facilitados para el desarrollo de este trabajo, y mi gratitud se hace extensiva a cada miembro del laboratorio, compañeros de trabajo jubilados o en activo, que de una u otra manera han contribuido a que esta tesis sea posible.

Una mención especial, al profesor Dr. Sergio González González con el que siempre he podido contar y para los que han sido mis compañeros del departamento de Química, UD de Química Física, por la colaboración, complicidad de mi zipi y tantos los momentos de café compartidos...

A mis padres por sus lecciones de vida, y en especial a mi madre por haberme enseñado que con constancia y trabajo todo se consigue, y como no... por ser la mejor babysitter.

Un reconocimiento a la comprensión y ánimo que siempre me ha ofrecido mi familia, y especialmente a mi esposo e hijo por el tiempo robado a la familia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

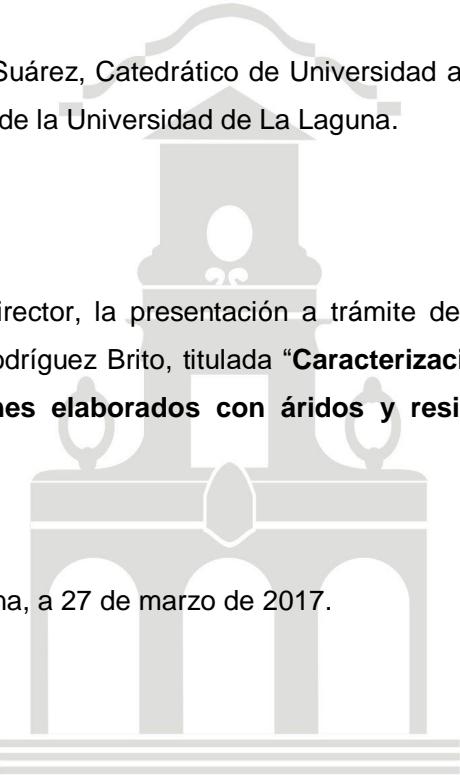
Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

D. Ricardo Manuel Souto Suárez, Catedrático de Universidad adscrito al Departamento de Química de la Universidad de La Laguna.

Autoriza, en calidad de Director, la presentación a trámite de la Tesis Doctoral de Da. Natalia Rodríguez Brito, titulada **“Caracterización de la durabilidad de hormigones elaborados con áridos y residuos de áridos de Canarias”**.

La Laguna, a 27 de marzo de 2017.


Fdo. Ricardo Manuel Souto Suárez

Facultad de Química, Avda. Astrofísico Fco. Sánchez, s/n - Campus de Anchieta - 38206-La Laguna (Tenerife), Spain - Tel: 922318067 - Fax: 922 318002 – rsouto@ull.es

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

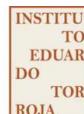
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA  
Y COMPETITIVIDAD



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN  
EDUARDO TORROJA (IETC)  
UNIDAD O DEPARTAMENTO

Dª María del Carmen Andrade Perdrix, con DNI 50268784F, Profesor de Investigación en el Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” del CSIC.

Autoriza, en calidad de co-Directora, la presentación a trámite de la Tesis Doctoral de Da. Natalia Rodríguez Brito, titulada **“Caracterización de la durabilidad de hormigones elaborados con áridos y residuos de áridos de Canarias”**.

La Laguna, a 7 Marzo de 2017.

C/SERRANO, GALVACHE 4  
28033 MADRID ESPAÑA  
TEL: 91 302 04 40  
FAX: 91 302 07 00

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Departamento de Ingeniería de Procesos

D. Juan José Santana Rodríguez, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería de Procesos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Autoriza, en calidad de Director, la presentación a trámite de la Tesis Doctoral de Da. Natalia Rodríguez Brito, titulada **“Caracterización de la durabilidad de hormigones elaborados con áridos y residuos de áridos de Canarias”**.

Las Palmas de Gran Canaria a 24 de marzo de 2017

Fdo.: Juan José Santana Rodríguez

t +34 928 451 945    juan.santana@ulpgc.es  
f +34 928 458 975    www.ulpgc.es

Edificio de Ingenierías  
Campus U. de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## ÍNDICE

### **1. INTRODUCCIÓN ..... 1**

<b>1.1. Justificación de esta tesis.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Antecedentes.....	1
1.1.2. Justificación del trabajo .....	2
1.1.3. Objetivos .....	4
1.1.4. Metodología .....	5
1.1.5. Plan de trabajo .....	6
1.1.6. Organización de los capítulos.....	8
1.1.7. Bibliografía .....	8

### **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ..... 13**

<b>2.1. El hormigón.....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Antecedentes.....	14
2.1.2. Durabilidad del hormigón.....	14
2.1.3. Clasificación del hormigón.....	19
2.1.4. Tipificación de los hormigones.....	19
2.1.5. Hormigón armado.....	20

### **2.2. Áridos ..... 21**

2.2.1. Áridos de Canarias.....	21
--------------------------------	----

---

i

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280      Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

---

## Índice

---

<b>2.3. El cemento .....</b>	<b>24</b>
2.3.1. Componentes del cemento .....	25
2.3.2. Designación de los cementos.....	29
2.3.3. Reacciones del cemento.....	32
<b>2.4. Cementos: aditivos y adiciones .....</b>	<b>32</b>
2.4.1. Aditivos.....	33
2.4.2. Adiciones .....	33
2.4.3. Cemento y medio ambiente .....	35
2.4.4. Producción de cemento .....	36
<b>2.5. Adiciones de materiales puzolánicos .....</b>	<b>37</b>
2.5.1. Generalidades.....	37
2.5.2. Actividad puzolánica.....	38
2.5.3. Puzolanidad y reactividad puzolánica .....	41
2.5.4. Humo de sílice .....	42
2.5.5. Origen de la puzolana en Canarias .....	44
<b>2.6. Referencias .....</b>	<b>47</b>

---

## 3. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES ..... 55

<b>3.1. Materiales empleados, fabricados y ensayados .....</b>	<b>55</b>
3.1.1. Áridos.....	55
3.1.2. Cementos .....	59

---

ii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

3.1.3. Adiciones .....	60
3.1.3.1. Filler (F) .....	61
3.1.3.2. Humo de sílice (HS) .....	62
3.1.3.3. Puzolana de toba (PZT) y puzolana de cantera (PZC) .....	63
3.1.3.4. Polvo de pulir (PV) .....	65
3.1.3.5. Actividad puzolánica de las adiciones .....	65
3.1.4. Pastas de cemento .....	66
3.1.5. Morteros .....	67
3.1.5.1. Identificación de las muestras de morteros .....	68
3.1.5.2. Fabricación de las muestras de morteros.....	68
3.1.5.3. Probetas y ensayos de morteros .....	70
3.1.6. Hormigones.....	71
3.1.6.1. Identificación de las muestras de hormigones .....	73
<b>3.2. Ensayos de laboratorio realizados .....</b>	<b>77</b>
3.2.1. Resistencia a flexión y compresión de morteros y pasta de cementos.....	77
3.2.2. Resistencia a compresión de hormigones .....	79
3.2.3. Ensayo de determinación de la consistencia fresca o asentamiento mediante el cono de Abrams .....	81
3.2.4. Ensayo de determinación de la densidad del hormigón fresco y endurecido .....	83
3.2.5. Penetración de agua bajo presión .....	83
3.2.6. Ensayo de resistividad eléctrica .....	85
3.2.6.1. Resistividad eléctrica. Método directo .....	86
3.2.6.2. Resistividad eléctrica. Método de cuatro puntas o Wenner .....	90
3.2.7. Determinación de la porosidad por intrusión de mercurio .....	92
3.2.8. Determinación de la porosidad accesible de agua .....	93

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

---

## Índice

---

3.2.9. Determinación de la carbonatación .....	94
3.2.9.1. Ensayo de carbonatación. Método natural .....	96
3.2.9.2. Ensayo de carbonatación. Método acelerado .....	97
3.2.10. Determinación de la penetración de cloruros.....	98
3.2.10.1. Ensayo de Inmersión en piscina.....	99
3.2.10.2. Ensayo del método multirregimen .....	102
3.2.10.3. Método Integral acelerado.....	107
3.2.10.4. Ensayo Integral acelerado modificado.....	112
<b>3.3. Referencias .....</b>	<b>114</b>
<b>4. CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE NATURALEZA CEMENTOSA .....</b>	<b>121</b>
<b>4.1. Introducción.....</b>	<b>121</b>
<b>4.2. Muestras, ensayos de porosidad realizados y resultados obtenidos.....</b>	<b>121</b>
4.2.1. Ensayos de porosidad por intrusión de mercurio .....	122
4.2.2. Ensayos de porosidad accesible .....	123
<b>4.3. Discusión de los resultados .....</b>	<b>125</b>
4.3.1. Porosidad por medidas de intrusión de mercurio (MIP).....	125
4.3.2. Ensayo por intrusión de mercurio (MIP) vs porosidad accesible .....	129
4.3.3. Relación entre porosidad y resistencia características de los hormigones .....	133

---

iv

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

<b>4.4. Durabilidad de los hormigones .....</b>	<b>138</b>
<b>4.5. Conclusiones .....</b>	<b>139</b>
<b>4.6. Referencias .....</b>	<b>140</b>
<b>5. ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MORTEROS, HORMIGONES DE OBRA Y HORMIGONES DOSIFICADOS CON MATERIALES DE CANARIAS .....</b>	<b>143</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>143</b>
<b>5.2. Evolución de la resistividad eléctrica de morteros, hormigones de obra y hormigones dosificados con el tiempo .....</b>	<b>144</b>
5.2.1. Evolución de la resistividad eléctrica de las muestras de mortero .....	151
5.2.2. Evolución de la resistividad eléctrica en hormigones de Canarias .....	156
5.2.3. Efecto del tipo de curado en la evolución de la resistividad eléctrica .....	159
5.2.4. Efecto de las dimensiones de las probetas en la evolución de la resistividad eléctrica.....	160
<b>5.3. Comparativa y validación de la resistividad indirecta medida con el equipo de construcción propia.....</b>	<b>162</b>
<b>5.4. Comparativa entre las medidas de resistividad directa e indirecta de hormigones fabricados en Canarias .....</b>	<b>167</b>
5.4.1. Medida de la resistividad directa por el método modificado de las arandelas.....	169

v

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

---

## Índice

<b>5.5. Conclusiones .....</b>	<b>171</b>
<b>5.6. Referencias .....</b>	<b>172</b>
<b>6. CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS .....</b>	<b>175</b>
<b>6.1. Introducción .....</b>	<b>175</b>
<b>6.2. Ensayos realizados y tabla resumen de resultados para la comparativa de morteros.....</b>	<b>175</b>
<b>6.3. Resultados y discusión de ensayos para la comparativa de morteros.177</b>	
6.3.1. Ensayos de resistencia a compresión.....	177
6.3.2. Ensayos de porosidad accesible .....	179
6.3.3. Ensayos de resistividad a 28 días .....	180
6.3.4. Ensayos de penetración de cloruros en piscina.....	181
6.3.5. Ensayos de carbonatación .....	183
6.3.6. Discusión general .....	187
<b>6.4. Resultados y discusión de ensayos para la comparativa de durabilidad de las amasadas de hormigón .....</b>	<b>192</b>
6.4.1. Ensayos de resistencia, consistencia y densidades.....	194
6.4.2. Ensayos de porosidad accesible .....	198
6.4.3. Ensayos de penetración de agua .....	200
6.4.4. Ensayos de resistividad eléctrica de las dosificaciones de laboratorio .....	200
6.4.4.1. Resistividad eléctrica. Método directo a los 28 días .....	200

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

6.4.4.2. Resistividad eléctrica. Comparativa de los tres métodos de resistividad .....	202
6.4.5. Ensayos de carbonatación .....	203
6.4.5.1. Ensayos de carbonatación natural. Método B .....	204
6.4.5.2. Ensayos de carbonatación. Método acelerado.....	205
6.4.6. Medida de la penetración de cloruros.....	207
6.4.6.1. Inmersión en piscina .....	207
6.4.6.2. Método multirregimen.....	211
6.4.6.3. Método integral acelerado.....	214
6.4.7. Relación entre ensayos.....	215
<b>6.5. Conclusiones .....</b>	<b>221</b>
<b>6.6. Referencias .....</b>	<b>224</b>
<b>7. ANÁLISIS DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS DE HORMIGÓN CON ADICIONES, SEGÚN LA MODELIZACIÓN DE LA EHE-08.....</b>	<b>229</b>
7.1. Introducción .....	229
7.2. Cálculos relativos al Estado Límite de durabilidad .....	229
7.3. Método general de cálculo.....	230
7.4. Modelos de durabilidad para los procesos de corrosión .....	230

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

---

## Índice

---

7.4.1. Generalidades.....	230
7.4.2. Periodo de iniciación .....	231
7.4.2.1. Modelo de carbonatación .....	231
7.4.2.2. Modelo de penetración de cloruros.....	233
7.4.3. Periodo de propagación.....	235
7.4.4. Estimación de la vida útil debido a la corrosión de las armaduras .....	235
<b>7.5. Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras.....</b>	<b>236</b>
<b>7.6. Resultados de la aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión. .....</b>	<b>238</b>
7.6.1. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante el modelo de carbonatación.....	239
7.6.2. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante el modelo de penetración de cloruros.....	242
<b>7.7. Conclusiones .....</b>	<b>245</b>
<b>7.8. Referencias .....</b>	<b>245</b>
<b>8. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>249</b>
<b>ANEXO I – SIMBOLOGÍA .....</b>	<b>257</b>
<b>ANEXO II – AMASADAS DOSIFICADAS EN LABORATORIO .....</b>	<b>267</b>

---

viii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280      Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**ANEXO III- MEDIDAS DE POROSIDAD POR INTRUSIÓN DE MERCURIO .... 279**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

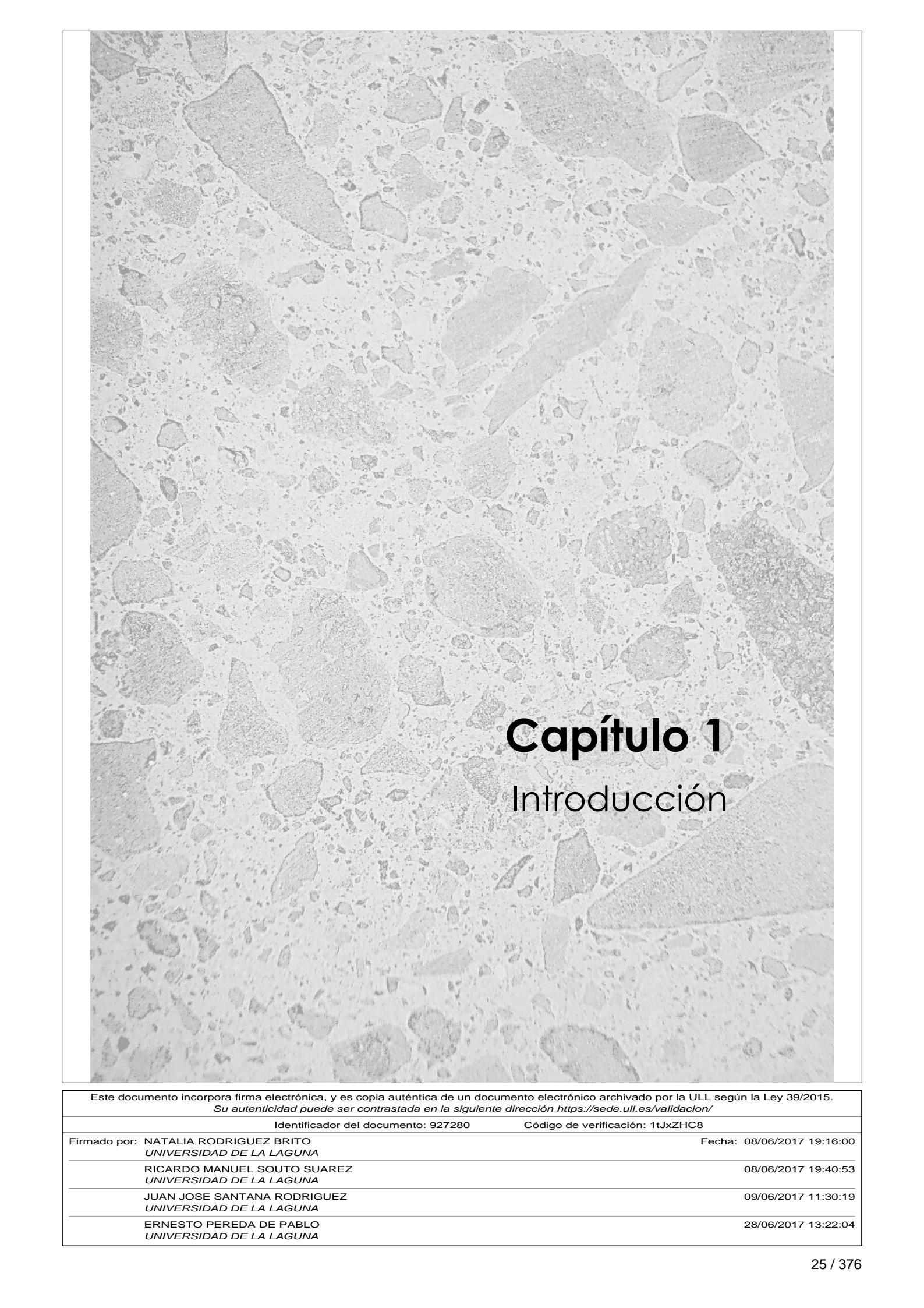
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



# Capítulo 1

## Introducción

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

### ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>    1.1. Justificación de esta tesis .....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Antecedentes .....	1
1.1.2. Justificación del trabajo .....	2
1.1.3. Objetivos .....	4
1.1.4. Metodología .....	5
1.1.5. Plan de trabajo .....	6
1.1.6. Organización de los capítulos .....	8
1.1.7. Bibliografía .....	8

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN.

### 1.1. Justificación de esta tesis.

#### 1.1.1. Antecedentes.

El hormigón es un elemento de amplio uso en la construcción debido a su relativo bajo coste y sus propiedades mecánicas y fácil trabajabilidad, entre otras. Entre las distintas propiedades que ha de presentar un hormigón nos encontramos con la durabilidad.

Cuando en el año 1998 apareció la denominada Instrucción de Hormigón Estructural, actualmente en su versión de 2008, EHE-08 [1], publicada por Real Decreto 1247 de 18 de julio, que es la normativa que actualmente rige el diseño, cálculo, construcción y control de las estructuras de hormigón armado, supuso una revolución en materia de durabilidad. Se trataba de prestar especial atención en conseguir estructuras más durables, puesto que se llevaba detectando cómo muchas estructuras de hormigón presentaban patologías no deseables demasiado pronto en su vida útil.

En la EHE-08, se define la durabilidad como la capacidad de una estructura de hormigón para soportar, durante la vida útil para la que fue proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta. En ese tiempo la estructura debe mantener su idoneidad de uso. Pasado ese plazo, se admite que no compense reparar la estructura por su elevado coste, y su posible deterioro puede exigir la demolición.

Los factores que pueden disminuir la durabilidad del hormigón se pueden clasificar en agentes mecánicos (sobrecargas, vibraciones), físicos (heladas, fuego), biológicos (microorganismos, vegetación) y químicos (terrenos de sulfatos, productos químicos industriales). En los factores químicos juega un importante papel el transporte de sustancias agresivas a través de sus poros. Dichas sustancias pueden difundirse tanto en fase líquida como gaseosa, con el peligro de que alcancen la armadura y provoquen su degradación. Entre ellas cabe destacar los iones cloruros y el CO<sub>2</sub> causante de la carbonatación de la muestra, que hacen que el hormigón pierda sus propiedades protectoras. En un trabajo previo [2] se ha caracterizado el efecto que ejercen las distintas atmósferas presentes en la isla de Tenerife en la penetración de estos agresivos en hormigones tipo canarios, desarrollando modelos de transporte de contaminantes tanto en difusión atmosférica como en la estructura de hormigón.

La cuantificación y caracterización de la porosidad de la mezcla es un factor importante a la hora de determinar o predecir el comportamiento de la estructura. Se han descrito y normalizado diferentes técnicas para la cuantificación y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

caracterización de la porosidad de una mezcla, siendo la determinación de la porosidad por intrusión de mercurio la más habitual. Entre las ventajas que presenta esta técnica se encuentra el límite inferior de tamaño de poro que puede detectar (del orden de pocas unidades de nanómetros) así como el aporte de información acerca de la morfología de las mismas. Recientemente se ha establecido bajo norma la técnica de porosidad accesible por agua aplicada a hormigones [3], la cual presenta la ventaja de no tener que trabajar con una sustancia peligrosa como el mercurio, así como su facilidad de aplicación. Sin embargo, se echa en falta estudios que correlacionen los datos aportados por ambas técnicas con la finalidad de establecer una relación entre las porosidades determinadas con ellas.

Tal vez la variable de más peso relacionada con el comportamiento de un hormigón sea la resistencia a la compresión, ya que es la variable que nos limitará la aplicabilidad estructural del mismo. Más recientemente se está trabajando en la incorporación de variables de predicción de la durabilidad del hormigón en base a ensayos de naturaleza electroquímica no destructivos. Cabe destacar el gran desarrollo que ha tenido la medida de resistividad eléctrica como parámetro para poder determinar la durabilidad de un hormigón [4,5].

### 1.1.2. Justificación del trabajo.

El hormigón es un material heterogéneo, producto resultante de la mezcla de un conglomerante que, junto con el agua, forma la pasta a la que se le añaden áridos que deben cumplir determinadas condiciones en cuanto a sus características mecánicas y químicas. Como conglomerante para el hormigón se usa el cemento artificial y los áridos que se utilizan son de distintas granulometrías. Se define como áridos a las partículas de roca que, unidas con o sin ligante, constituyen una parte o la totalidad de una estructura constructiva u obra civil. Según su origen el árido puede ser natural, artificial o reciclado. Los áridos empleados en Canarias son naturales y, debido a la singularidad geológica del archipiélago, de origen volcánico. Se forman por la disgregación natural (barrancos) o de machaqueo (procesos mecánicos industriales) de rocas volcánicas. Canarias constituye un auténtico laboratorio natural para el estudio del fenómeno volcánico, ya que aquí se pueden encontrar la gran mayoría de rocas volcánicas que existen en el planeta [6].

La industria del cemento es una de las que más cantidad de energía consumen en todo el mundo. Específicamente, las industrias cementeras absorben el 2% del consumo total de energía y un 5% de la energía industrial a nivel mundial. Desde el punto de vista medioambiental y respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, el sector de materiales de construcción es el tercer mayor emisor de CO<sub>2</sub> del sector industrial en todo el mundo, incluida la Unión Europea [7]. Este sector representa el 10% del total de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, la mayoría de los cuales están relacionados con la fabricación de hormigón [8]. Aproximadamente el 85% de estas emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la producción de cemento [9], tanto

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		

en su fabricación (95%) como en el transporte de materias primas y productos terminados (5%) [10]. Por lo tanto, un ahorro en la producción de cemento implicaría una disminución considerable de la emisión de CO<sub>2</sub> y es en esa vía donde se están concentrando los esfuerzos.

Tal y como se comentó anteriormente, la producción del cemento consume gran cantidad de energía. La sustitución parcial de algunos de sus componentes por otros productos tales como puzolanas, cenizas y otros productos residuales, estandarizados por normas europeas [11], conduce a una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Esta sustitución parcial en los componentes del cemento no ha de afectar a la durabilidad de las estructuras de hormigón, y podrá cuantificarse a partir de ciertas variables recogidas en la EHE-08. Tanto las condiciones de servicio, como la exposición a agentes ambientales agresivos y el uso o condiciones de mantenimiento inadecuados afectan a la vida útil de la estructura [12].

La degradación del hormigón puede ser la consecuencia de diversas causas [13], tanto de naturaleza física, química como mecánica, pudiendo en ocasiones producirse sinergias entre los factores químicos y los fenómenos físicos [14]. La causa del deterioro del hormigón armado que merece mayor atención es la corrosión de armaduras [15-17]. De hecho, es una de las manifestaciones patológicas más importantes que afectan a las estructuras de hormigón armado [18].

Las adiciones aplicadas al hormigón en sustitución del cemento interactúan químicamente con las reacciones de hidratación del cemento, otorgándole nuevas propiedades a la mezcla. Esto afectará al proceso de penetración de agresivos (CO<sub>2</sub> y cloruros). La carbonatación se caracteriza por ser un proceso de naturaleza físico-química por el que se producen una serie de reacciones químicas en la presencia de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual se difunde a través del hormigón, dando lugar a la reducción de pH en el hormigón. Tanto la reacción de carbonatación como la penetración del CO<sub>2</sub> ocurren simultáneamente, dando lugar a una capa carbonatada (limitada por el denominado frente de carbonatación) que aumenta en espesor con el tiempo.

En cuanto a los iones cloruro, estos pueden venir incluidos en el propio material que conforma el hormigón o ser aportados por una fuente externa. Esta fuente externa es el aerosol marino, el cual lo transporta tierra adentro, depositándose sobre la superficie del hormigón y difundiéndose posteriormente hacia la armadura. Una vez alcanza la armadura, provoca en ésta el proceso corrosivo. Para que esto tenga lugar se ha de alcanzar una concentración crítica de cloruros (C<sub>th</sub>).

El contenido de cloruro crítico en el hormigón armado ha sido objeto de numerosos estudios, encaminados principalmente a fijar un valor de concentración crítica de estos iones que pueda provocar corrosión en la armadura [19]. Los distintos procedimientos experimentales empleados para cuantificar y caracterizar el proceso

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

de ingreso del cloruro en el hormigón ponen de manifiesto la intervención de varios factores, aunque muchas de las configuraciones experimentales utilizadas no son adecuadas para dar resultados realistas, ya que suelen ser estudios de laboratorio realizados bajo condiciones controladas, difícilmente extrapolables a las condiciones reales de operación de estos materiales. Sin embargo, el método integral es un método de naturaleza electroquímica que permite realizar estudios comparativos de penetración de cloruros entre diferentes dosificaciones de hormigones.

Además de los dos agentes químicos mencionados anteriormente, existen variables ambientales que afectan a la corrosión y degradación del hormigón armado. Entre ellas destacamos la humedad, la temperatura y la velocidad de viento, entre otras, como las más importantes.

### 1.1.3. Objetivos.

El objeto de este proyecto es el estudio de la incorporación de ciertos materiales considerados residuos en la dosificación de morteros y hormigones reemplazando, por un lado, al porcentaje en peso de cemento utilizado y, por otro, al porcentaje de áridos. Se analizaron las propiedades de las mezclas resultantes, así como la durabilidad de las mismas según los requisitos recogidos en la EHE-08. Se analizó la relación entre distintas variables tales como porosidad, resistencia a compresión, resistividad eléctrica, etc., con la finalidad de obtener modelos de predicción. Asimismo, se evaluó la viabilidad del empleo de la resistividad eléctrica como parámetro que permita deducir la durabilidad de un hormigón. En este contexto, se definieron los siguientes objetivos generales:

1. Estudiar el efecto que ejercen la adición de distintos materiales en las propiedades tanto de morteros como de hormigones, en base a los más usados en los hormigones elaborados en Tenerife. Para ello se reemplazó parte del cemento de las mezclas por dichos materiales en calidad de adición y, en otros casos, como incorporación de superfinos sin restar parte de cemento a la mezcla.
2. Analizar el efecto que ejercen dichas adiciones en la durabilidad de las muestras formuladas. A partir de las especificaciones marcadas por la EHE-08, se analizó el efecto que ejercen dichas adiciones en la durabilidad de la muestra.
3. Establecer relaciones entre variables características de un mortero/hormigón con la finalidad de obtener modelos de predicción. La naturaleza de los ensayos efectuados a materiales de naturaleza cementosa es muy variada y, en ciertos casos, muy compleja. Se obtuvieron modelos que permiten predecir ciertas variables a partir de otras de realización menos compleja.
4. Analizar la viabilidad del empleo de la técnica de la resistividad eléctrica como parámetro que permita determinar la durabilidad de un hormigón.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

#### **1.1.4. Metodología.**

Objetivo 1. Preparación de probetas de pasta de cemento, mortero y hormigón con y sin adiciones.

En esta parte del trabajo se formularon probetas tanto de pasta de cemento, mortero y hormigones, con y sin adiciones, con la finalidad de analizar el efecto que en ellas ejercen. Para ello se escogieron formulaciones tipo de las empleadas en Canarias, con los tipos de cemento, áridos y finos de mayor uso en las islas. Las muestras fueron fabricadas tanto en laboratorio (entorno controlado) como tomadas directamente de obra para que fueran más representativas de la realidad.

Las adiciones a estudiar consistieron en materiales provenientes tanto de material comercial como de desecho de cantera y del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción. Así, se ensayaron puzolana de toba, puzolana de cantera, humo de sílice, polvo de pulir (residuo del molido del hormigón en el laboratorio) y filler (residuo de los áridos del asfalto).

Objetivo 2. Selección de los métodos de ensayo que nos permitan caracterizar las propiedades de los distintos materiales y muestras a analizar.

Se seleccionaron los ensayos bajo norma que se realizaron a las diferentes muestras con la finalidad de obtener sus características previas a la elaboración de las probetas de ensayo, así como las propiedades de las muestras de pasta de cemento, mortero y hormigón elaborados a partir de ellas. Dichos ensayos fueron los rutinarios para dichas muestras, con la implementación de métodos electroquímicos para la caracterización de la penetración de agresivos de forma acelerada. Haciendo uso de técnicas electroquímicas, se analizó el tiempo de rotura de la pasividad de aceros en medios altamente alcalinos como los medios electrolíticos desarrollados en los poros del hormigón húmedos. El objetivo fue desarrollar un modelo de corrosión para los aceros pasivados por exposición a iones cloruros o disminución de la alcalinidad del medio, así como el desarrollo de un equipo de medida que nos permita comparar el comportamiento de diferentes muestras entre sí.

Las tareas a realizar fueron:

1. Diseño y construcción del equipo de análisis experimental bajo norma para realizar los ensayos de penetración de cloruros y picado de los aceros de la armadura en laboratorio.
2. Determinación del coeficiente de difusión de los iones cloruro a través de las muestras de hormigón, así como el tiempo de despasivación de la armadura, determinada por métodos electroquímicos.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Objetivo 3. Análisis de la relación entre variables con la finalidad de obtener modelos de predicción.

Dado el amplio abanico de análisis efectuados a las distintas muestras, se planteó el obtener modelos de correlación entre los más característicos, con la finalidad de poder predecir variables a partir de otras cuantificadas previamente. Asimismo, se planteó analizar la viabilidad de la técnica de resistividad eléctrica como técnica que nos permita predecir la durabilidad de una muestra de hormigón.

Objetivo 4. Análisis del efecto que ejercen las distintas adiciones en el comportamiento de las muestras formuladas.

A partir de los objetivos 1 y 2, en este cuarto objetivo se planteó el análisis de los resultados obtenidos en la caracterización de las distintas muestras y en el análisis de la viabilidad del uso de los materiales reseñados como adiciones. Para ello se tomó como principal variable la resistencia a la compresión y la durabilidad de las muestras de hormigón.

La cuantificación de la durabilidad se realizó según indicaciones de la norma EHE-08, en su anexo 9, tanto de forma aproximada, empleando valores guía, como a partir de los datos experimentales obtenidos.

#### 1.1.5. Plan de trabajo.

De forma esquemática, las tareas a desarrollar consistieron en:

**(1) Planificación de campañas experimentales que permitan reconocer la influencia de los diferentes constituyentes y adiciones del hormigón.** Este proceso se acometió empleando la siguiente secuencia de generación de muestras de estudio:

- 1.1. Preparación de morteros con el objeto de poder analizar posibles indicadores de las mejoras susceptibles de obtener a posteriori en los hormigones con distintas adiciones (filler, puzolana, humo de sílice).
- 1.2. Planteamiento de ensayos iniciales de las características que se esperan obtener, físicas y mecánicas, determinando luego las cantidades y proporciones a utilizarse para hacer la mezcla del hormigón, según lo estudiado.
- 1.3. Desarrollo de dosificaciones trabajables de hormigón, de las cuales una se tomó como patrón, planteando la incorporación de otros materiales como áridos para mejorar o al menos igualar sus características de durabilidad. Los

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		

materiales incorporados fueron filler, puzolana (con distintos tipos de puzolanicidad) y polvo de pulir.

**1.4. Campaña de realización de tomas de hormigón de obra, para la obtención de datos de resistividad y de porosidad.**

**(2) Ensayos a los componentes básicos de las amasadas.**

- 2.1. Granulometrías de los áridos, absorción y contenido de humedad en cada amasada.
- 2.2. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión de los cementos utilizados en cada amasada.
- 2.3. Determinación de la porosidad de la pasta de cemento.
- 2.4. Molido y granulometría de los tipos de adiciones (puzolanas, filler, polvo de pulir).
- 2.5. Ensayo de composición química de las adiciones.

**(3) Caracterización resistencia-durabilidad de mortero patrón y mortero dosificado.**

- 3.1. Resistencia a compresión de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3. Consiste en la aplicación de una fuerza por unidad de superficie o carga, mediante una prensa que cumpla la norma UNE EN 12390-4, a una velocidad constante hasta la rotura de la probeta. Todas las probetas de hormigón endurecido ensayadas fueron cilíndricas de 15x30, y cumplen las especificaciones de las normas UNE EN 12390-1 sobre la forma y dimensiones, así como la norma UNE EN 12390-2 sobre fabricación y curado.
- 3.2. Ensayo de penetración de agua bajo presión en los hormigones según UNE 83309-90, y en posterior actualización EN 12390-8. Es el ensayo propuesto por la Instrucción EHE-08, art. 37.3.3, para la comprobación experimental de la impermeabilidad del hormigón.
- 3.3. Densidad aparente fresca y endurecida según UNE EN 12350 y UNE EN 1015-10.
- 3.4. Determinación de la absorción de agua, densidad y porosidad accesible al agua del hormigón según UNE 83980.
- 3.5. Determinación de la densidad real y aparente, y de la porosidad abierta y total, para piedra natural según UNE EN 1936.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- 3.6. Ensayo de porosidad por intrusión de mercurio según ASTM D 4404.
- 3.7. Resistividad. Se determinó tanto la resistividad indirecta empleando el Método de las Cuatro puntas de Wenner según UNE 83988-1, como la resistividad directa según UNE 83988-1.
- 3.8. Medida del frente de carbonatación en el hormigón siguiendo la UNE-112011-94 y 83993-1, mediante un ensayo colorimétrico para determinación de Carbonatación Natural y Acelerada según UNE 83993-1 y 2.
- 3.9. Determinación de la penetración de cloruros, tanto en Piscina de Cloruros según PNE 83986, como para la determinación del coeficiente de difusión en hormigón endurecido según UNE EN 14629.
- 3.10. Determinación de penetración de cloruros en el hormigón, mediante el método integral acelerado según UNE 83992-2.
- 3.11. Determinación del coeficiente de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido, mediante el método multirregimen según UNE 83987.

#### **1.1.6. Organización de los capítulos.**

Todo lo anteriormente planteado está recogido en la siguiente tesis, la cual se ha organizado alrededor de 8 capítulos y tres anexos. El capítulo 1 abarca la introducción y justificación del presente estudio, haciendo hincapié en los objetivos propuestos, así como en la metodología a emplear. El capítulo 2 aborda el análisis del estado del arte hasta la actualidad, destacando aquellos aspectos donde este estudio pretende mejorar dicho estado. El capítulo 3 recoge todos los aspectos metodológicos y experimentales desarrollados en el presente estudio. Los capítulos 4 a 7 recogen los resultados experimentales obtenidos en función de los objetivos anteriormente propuestos, así como las conclusiones particulares de cada uno de ellos. Por último, el capítulo 8 está dedicado exclusivamente a recoger las conclusiones generales de esta tesis.

El documento finaliza con tres anexos que recogen información que, tanto por su naturaleza como por su extensión, se consideró adjuntarlas de esta forma y no en el cuerpo del texto donde son citadas, en aras de obtener un documento de lectura más agradable.

#### **1.1.7. Bibliografía.**

- [1] Ministerio de la Presidencia, REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- [2] C. Blanco Peñalver, Evaluación de la penetración de agresivos en estructuras de hormigón situadas en Canarias y su influencia en la corrosión de armaduras. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2015.
- [3] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. UNE 83980. AENOR. Madrid, 2014.
- [4] R.M. Ferreira, S. Jalali, NDT measurements for the prediction of 28 days compressive strength, *NDT&E Int.* 43 (2010) 55-61.
- [5] C. Andrade, The limit of service life of concrete structures. Encontro Nacional Betão Estrutural 2004, FEUP, Porto, 2004, pp.1-25.
- [6] L.E. Hernández Gutiérrez, Caracterización Geomecánica de las Rocas Volcánicas de las Islas Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2014.
- [7] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, N. Roussel, Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 820–826
- [8] P. Capros, N. Kouvaritakis, L. Mantzos, Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: top-down analysis of greenhouse gas emission possibilities in the E.U., Contribution to a Study for DG Environment, European commission, 2001.
- [9] L. Parrott, Cement, Concrete and Sustainability, A Report on the Progress of the UK Cement and Concrete Industry Towards Sustainability, Tech. rep., British Cement Association, 2002.
- [10] P. Teller, S. Denis, R. Renzoni, A. Germain, P. Delaisse, H. d'Inverno, Use of LCI for the decision-making of a Belgian cement producer: a common methodology for accounting CO<sub>2</sub> emissions related to the cement life cycle, 8th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, 2000.
- [11] AENOR. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cements comunes, UNE-EN 197-1. AENOR, Madrid, 2011.
- [12] M. Ciampoli, Time dependent reliability of structural systems subject to deterioration, *Comput. Struct.* 67 (1998) 29-35.
- [13] A.M. Neville, Properties of Concrete, 5<sup>a</sup> ed., Pearson, Nueva York, 2011.
- [14] A. Silva, R. Neves, J. de Brito, Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete, *Cem. Concr. Comp.* 50 (2014) 73-81.
- [15] Y.G. Du, A.H.C. Chan, L.A. Clark, Finite element analysis of the effects of radial expansion of corroded reinforcement, *Comput. Struct.* 84 (2006) 917-929.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 1

---

- [16] R. Neves, F.A. Branco, J. de Brito, A method for the use of accelerated carbonation tests in durability design, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 585-591.
- [17] A.V. Saetta, B.A. Schrefler, R.V. Vitaliani, 2-D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 1703-1712.
- [18] P.K. Mehta, Durability of concrete – fifty years of progress?, en: Durability of Concrete – 2nd International Conference on Durability of Concrete, vol. 1, Montreal, 1991, pp. 1-31.
- [19] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete - A review, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 1122-1138.

---

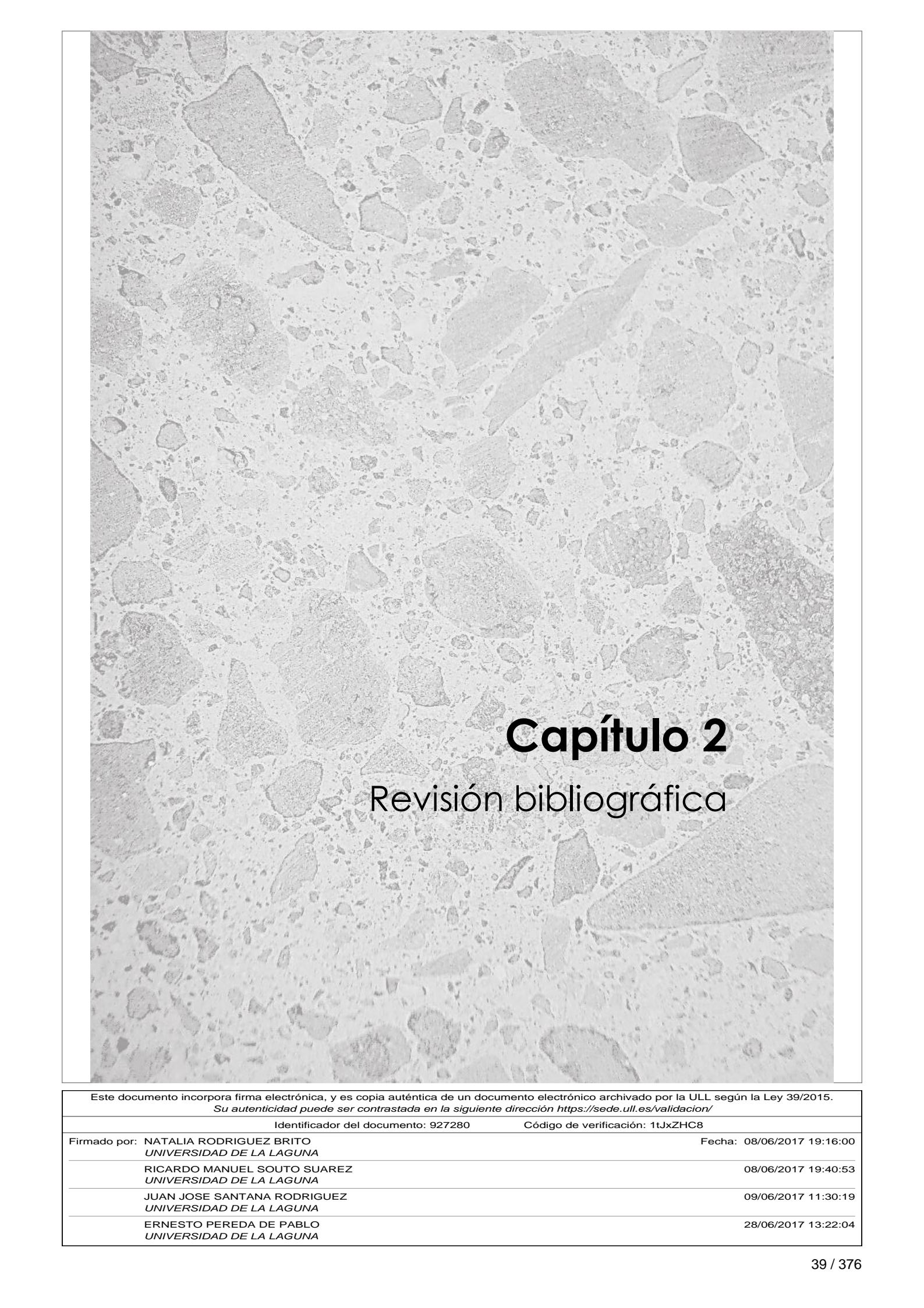
10

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



# Capítulo 2

## Revisión bibliográfica

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### ÍNDICE

<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. El hormigón .....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Antecedentes.....	14
2.1.2. Durabilidad del hormigón.....	14
2.1.3. Clasificación del hormigón.....	19
2.1.4. Tipificación de los hormigones .....	19
2.1.5. Hormigón armado.....	20
<b>2.2. Áridos .....</b>	<b>21</b>
2.2.1. Áridos de Canarias.....	21
<b>2.3. El cemento .....</b>	<b>24</b>
2.3.1. Componentes del cemento .....	25
2.3.2. Designación de los cementos.....	29
2.3.3. Reacciones del cemento .....	32
<b>2.4. Cementos: aditivos y adiciones .....</b>	<b>32</b>
2.4.1. Aditivos .....	33
2.4.2. Adiciones .....	33

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280      Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

2.4.3. Cemento y medio ambiente .....	35
2.4.4. Producción de cemento .....	36
<b>2.5. Adiciones de materiales puzolánicos .....</b>	<b>37</b>
2.5.1. Generalidades.....	37
2.5.2. Actividad puzolánica.....	38
2.5.3. Puzolanidad y reactividad puzolánica .....	41
2.5.4. Humo de sílice .....	42
2.5.5. Origen de la puzolana en Canarias .....	44
<b>2.6. Referencias .....</b>	<b>47</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 2 – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

### 2.1. El Hormigón.

El hormigón es un material de construcción muy usado en la actualidad, de masa no homogénea, formado por la mezcla de un conglomerante que, junto con el agua, forman la pasta a la que se le añaden unos aditivos específicos y partículas de áridos de diferentes tamaños. El resultado después del amasado debe ser una mezcla íntima de los componentes, de forma que el hormigón resultante cumpla determinadas características condicionantes tanto mecánicas como químicas. Como conglomerante para el hormigón actual, se puede utilizar una amplia gama de cementos artificiales, y como áridos un mínimo de dos tipos, que se clasifican según su granulometría en arena y grava.

En la figura 2.1 se muestra una foto de la macroestructura de un hormigón, visible al ojo humano, obtenida de la sección de corte de una probeta. Distinguimos por una parte el corte de los áridos de color más oscuro y rojizo, de varios tamaños y formas, y por otra parte una masa cementante o pasta de cemento hidratada de color gris que rodea, envuelve y conecta a los distintos áridos.



**Figura 2.1.-** Foto de la macroestructura del hormigón.

Su uso extendido se debe a ventajas como que sus componentes básicos son fáciles de obtener, su capacidad de llenado de moldes, la posibilidad de adoptar formas y la trabajabilidad, plasticidad y docilidad en su fase inicial de hormigón fresco sin necesidad de calor. Al fraguar endurece y se vuelve denso, adquiriendo resistencia a compresión, a la fatiga, al impacto y desgaste, resistencia al fuego, buena durabilidad, adherencia acero/hormigón, posibilidad de reparación y de dar un acabado y terminación a su superficie personalizados, etc. Entre sus desventajas destacamos su porosidad, inestabilidad dimensional, cambios higroscópicos, sensibles a la humedad y secado, con dilataciones y contracciones de su masa, posibilidad de ataque y degradación por distintos agentes agresivos y su baja resistencia a flexión.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 2.1.1. Antecedentes.

La palabra hormigón, según M<sup>a</sup>. Teresa Solesio de la Presa [1] tiene su origen en Roma, de las palabras latinas *paries* formaceos que significa pared hecha de molde, la palabra *formicare* como sinónimo de *formare*, y que deriva en *hormigare* (*hormigar*), y como aumentativo hormigón.

En un contexto histórico, se han datado estructuras de hormigón de más de 5000 años en el norte de Chile. Estas primeras muestras de un hormigón muy rudimentario eran en paredes de chozas, donde se usaba algas calcinadas (huiro) a manera de conglomerante, mezcladas con áridos locales y agua de mar, obteniendo morteros de hasta 6 N/mm<sup>2</sup> [2-4].

Los egipcios también empleaban morteros de cal y yeso para sus construcciones, y los griegos una mezcla de piedras y arcillas. Pero fueron los romanos los que fueron perfeccionando las técnicas, y descubren la manera de fabricar un cemento a base de cal viva y cenizas volcánicas de la zona de Puzzuoli, llamándolo cemento de puzolana [4], empleado en la construcción de grandes obras civiles y monumentales como acueductos, coliseos, puentes, el Panteón de Agripa, etc. Y llegándose a la actualidad una gran recopilación de sus conocimientos y de los materiales y procesos a través de los 10 libros de Arquitectura de Vitrubio [5].

En los siglos siguientes decae el uso del hormigón y no es hasta el siglo XVII que J. Parker patentó un método para fabricar cemento hidráulico a partir de la calcinación de una piedra obtenida en la isla de Sheppy, que se bautizó como "cemento romano". Ya en el siglo XIX, L.J. Vicat en Francia con el estudio, investigación y fabricación por vía húmeda del cemento, marcando el inicio del proceso de fabricación actual y J. Aspdin en Gran Bretaña fabrica el cemento artificial llamado "cemento Portland" debido a que el color resultante era parecido al de la piedra de dicha península [6]. Lambot da inicio a las primeras formas de hormigón armado, al combinar acero y hormigón. Monier se da cuenta de la importancia industrial, lo patenta y construye el primer puente de hormigón armado [4]. Ya a principios del siglo XX, empieza a extenderse la aplicación del hormigón en obras singulares, se introducen las enseñanzas de las técnicas en las escuelas de ingenieros, creándose los cimientos del hormigón armado, llegando a nuestros días, tras una constante investigación, mejoras y rápida evolución con avances tecnológicos. Y cabe esperar que el hormigón en un futuro siga perfeccionándose y puliendo sus defectos y desventajas.

### 2.1.2. Durabilidad del hormigón.

Las estructuras de hormigón armado son susceptibles a deteriorarse, son sensibles al tiempo. La degradación de sus características mecánicas pone en peligro la capacidad funcional para las que fueron diseñadas. Esta degradación puede

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

ocurrir debido a las condiciones de servicio, la exposición a agentes ambientales agresivos, y el uso o condiciones de mantenimiento inadecuados [7].

Con el objeto de controlar y disminuir las patologías derivadas de los procesos de deterioro, que impidan que la estructura se comporte de acuerdo con las hipótesis para la que ha sido proyectada, la última Instrucción estructural del hormigón (EHE-08) [8], profundiza en el tratamiento de la durabilidad de las estructuras de hormigón, introduciendo estimaciones de la vida útil, ensayos, gestión de la calidad en las obras, inspecciones y transparencia de ejecución, mediante la incorporación del Capítulo 7 y el Anejo 9. Así, se debería garantizar un tiempo de vida útil, definiéndola como el “periodo durante el cual deben cumplirse las exigencias iniciales de uso, con una conservación normal y sin actuaciones de rehabilitación”. La propiedad desde el inicio del proyecto deberá fijar esta vida útil estructural en períodos no inferiores a los de la tabla 2.1 establecidos por la instrucción.

**Tabla 2.1.-** Vida útil según el tipo de estructura, recogido en el Capítulo I, Tabla 5 de la EHE-08 [8].

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructura de carácter temporal	3 a 10 años
Elementos reemplazables que no formen parte de la estructura principal (barandilla, apoyos de tuberías...)	10 a 25 años
Edificios o instalaciones agrícolas, industriales y obras marítimas	15 a 50 años
Edificios de viviendas, oficinas y estructuras de obra civil	50 años
Edificios de carácter monumental o importancia especial	100 años
Puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

Así, tal y como indica la instrucción, la vida útil está directamente relacionada con un planteamiento eficaz y coherente ante los distintos estados límites de durabilidad, producidos por las acciones físicas y químicas que degradan al hormigón hasta llegar a incapacitar a la estructura para el uso que fue proyectada, compitiendo el tiempo de la vida útil ( $t_d$ ) con el tiempo que el agresivo tarda en degradar a la estructura significativamente ( $t_L$ ), de manera que  $t_L$  sea siempre mayor o igual a  $t_d$ .

Para establecer la durabilidad adecuada, se deberá hacer un planteamiento inicial en el que se identifiquen los posibles agresivos a los que va a estar sometido el hormigón y se establezca el tipo de ambiente. El tipo de ambiente viene definido por una clase general de exposición y una clase específica de exposición (tabla 2.2) y clasificación de la agresividad química (tabla 2.3).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 2.2.- Clases generales y específicas de exposición, según Capítulo II, variante de tabla 8.2.2 y 8.2.3 de la EHE-08 [8].**

Clase general de exposición					
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	Descripción	
No agresiva		I	Ninguno	Interior de edificios no sometidos a condensaciones.	
Humedad alta		IIa	Corrosión de origen diferente a los cloruros	Exterior sometidos a humedades relativas medias altas ( $>65\%$ ) o a condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600mm. Elementos enterrados o sumergidos.	
Normal	Humedad media	IIb		Exteriores en ausencia de cloruros, y sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600mm.	
Aérea		IIIa		Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar. Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de las líneas costeras ( $< 5$ km).	
Marina	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar.	
	Zona de carrera de mareas y salpicaduras	IIIc		Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicadura o en zonas de marea.	
	Con cloruros de origen diferente del medio marino	IV	Corrosión por cloruros	Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionadas con el ambiente marino. Superficies expuestas a sales de hielo y deshielo no impermeabilizadas.	
Clase específica de exposición					
Química agresiva	Débil	Qa		Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta.	
	Media	Qb	Ataque químico	Elementos en contacto con el agua del mar.	
	Fuerte	QC		Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media.	
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque helo-deshielo	Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad, relativa media ambiental en invierno >75% y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar una temperatura por debajo de -5°C.	
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas al año con un valor medio de temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C.	
Erosión		E	Abrasion cavitación	Elementos sometidos a desgaste superficial. Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua.	

**Tabla 2.3.-** Clasificación de la agresividad química según capítulo II, tabla 8.2.3.b de la EHE-08 [8].

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición		
		Q <sub>a</sub>	Q <sub>b</sub>	Q <sub>c</sub>
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	Valor del pH, según UNE 83952	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	< 4,5
	CO <sub>2</sub> agresivo (mg CO <sub>2</sub> /L), según UNE-EN 13577	15 - 40	40 - 100	> 100
	Ion amonio (mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L), según UNE 83954	15 - 30	30 - 60	> 60
	Ion magnesio (mg Mg <sup>2+</sup> /L), según UNE 83955	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
	Ion sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L), según UNE 83956	200 - 600	600 - 3000	> 3000
	Residuo seco (mg/L), según UNE 83957	75 – 150	50 – 75	< 50
Suelo	Grado de acidez Baumann-Gully (mL/kg), según UNE 83962	> 200	(*)	(*)
	Ion sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg de suelo seco), según UNE 83963	2000 - 3000	3000-12000	> 12000

(\*) Estas condiciones no se dan en la práctica

Establecidas las condiciones ambientales reales de obra, se debe de componer un elemento estructural que satisfaga las exigencias del proyecto desde el punto de vista mecánico, reológico y de durabilidad, teniendo en cuenta armaduras, superficies, compactación, etc.

Para que el hormigón tenga la capacidad de ser durable frente a las agresiones físicas y químicas, y tenga la vida útil esperada, debemos de seleccionar tanto las materias primas como la dosificación, junto con las características de la obra. La instrucción vigente marca parámetros de dosificación general y adicional, que debe cumplir un hormigón como las relaciones agua/cemento, cantidad mínima de cemento y resistencia mínima recomendada según al ambiente al que estará expuesto (tabla 2.4).

Como hemos comentado, la degradación que se produce en las estructuras de hormigón puede ser la consecuencia de diversas causas, tanto de naturaleza física, química, como mecánica, pudiendo en ocasiones producirse sinergias entre los factores químicos y los fenómenos físicos [9,10]. Siendo la corrosión la causa del mayor grado de deterioro del hormigón armado, merece una mayor atención [11-12]. De hecho, es una de las manifestaciones patológicas más importantes que afectan a las estructuras de hormigón armado [8].

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 2.4.-** Parámetros de dosificación, máxima relación agua/cemento, mínimo contenido de cemento, resistencia mínima en N/mm<sup>2</sup>, según los parámetros de exposición, tabla 37.3.2.a y 37.3.2.b de la EHE-08 [8].

Parámetro de dosificación	Tipo de dosificación	Ambientes de exposición										
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Ga	Qb	QC	H
Masa	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55
Máxima relación a/c/to	Armado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50
Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,45	0,45	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Masa	200	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300
Armando	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	350	325
Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	350	300
Resistencia mínima en (N/mm <sup>2</sup> )	Masa	20	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30
Armando	25	25	30	30	35	30	30	30	30	35	30	30
Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30

En la interacción acero-hormigón, la alcalinidad de este último protege a la armadura de la corrosión. Pero esta alcalinidad, en casos de una estructura porosa del hormigón, se reduce debido a la penetración de agentes externos hasta provocarse la corrosión de la armadura, provocando cambios físicos y químicos en el seno del mismo. De acuerdo con Hussain *et al.* [13] y en particular Tuutti [14] es muy antigua la identificación de los dos agentes principales causantes del inicio de la corrosión de la armadura debido a la destrucción de su revestimiento pasivo: la carbonatación y la entrada de cloruros.

La carbonatación es un proceso de naturaleza físico-química, que se produce cuando al difundirse el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a través del hormigón, se dan una serie de reacciones químicas, dando lugar a la reducción de pH en el hormigón. Simultáneamente a medida que penetra del  $\text{CO}_2$  ocurre la reacción de carbonatación dando lugar al frente de carbonatación, y esta capa carbonatada que aumenta en espesor con el tiempo.

En cambio, el ataque de los iones cloruro, pueden provenir de los materiales del propio del hormigón o ser de una fuente externa, como el aerosol marino. Este último se deposita sobre la superficie del hormigón y se difunde hacia la armadura, y al alcanzar la concentración crítica de cloruros ( $C_{th}$ ) se inicia el proceso de corrosivo.

El contenido de cloruro crítico en el hormigón armado ha sido objeto de numerosos estudios, encaminados principalmente a fijar un valor de concentración crítica de estos iones que pueda provocar corrosión en la armadura [15]. En el proceso de penetración de los cloruros intervienen varios factores, pero muchos de los ensayos son realizados en condiciones de laboratorio, no del todo comparables con un proceso real, por lo que existe un campo de trabajo al respecto con el claro objetivo de relacionar datos experimentales de laboratorio con datos de exposición natural de larga duración, estableciendo modelos. A su vez, estos dos agentes agresivos químicos se ven afectados por variables ambientales como son la humedad y la temperatura. En Canarias, cabe destacar el estudio realizada por C. Blanco correlacionando dichos valores y caracterizando la agresividad ambiental de la isla de Tenerife frente a hormigones tipo canarios [16].

#### **2.1.3. Clasificación del hormigón.**

Atendiendo a su forma de trabajar o entrada en carga, al hormigón, de forma genérica, se lo puede clasificar en tres grandes grupos: hormigón en masa, hormigón armado y hormigón pretensado. Se puede resumir que el hormigón en masa no contiene armaduras por lo que su funcionamiento más adecuado es resistir esfuerzos de compresión. El hormigón armado, en cambio, contiene una armadura tal que le capacita para resistir solicitudes de compresión y flexión. En el hormigón pretensado se le aplica una tensión mediante el tensado de tendones de acero en su interior. Otros hormigones pueden ser los hormigones ligeros, con fibras, de altas prestaciones como los autocompactantes, los de alta resistencia y los hormigones con materiales reciclados.

#### **2.1.4. Tipificación de los hormigones.**

Los hormigones se tipifican siguiendo el esquema propuesto por la Instrucción de hormigón estructural del Ministerio de Fomento (EHE-08), según el artículo 39.2 [8], en el que los hormigones se designan de acuerdo con el siguiente formato:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

$$T - R / C / TM / A$$

donde:

- $T$ , será  $HM$  en el caso del hormigón en masa,  $HA$  en el caso de hormigón armado, y  $HP$  en el caso de hormigón pretensado.
- $R$ , es la resistencia característica especificada ( $N/mm^2$ ).
- $C$ , es la letra inicial del tipo de consistencia:  $S$  seca,  $P$  plástica,  $B$  blanda,  $F$  fluida y  $L$  líquida.
- $TM$ , es el tamaño máximo del árido (mm).
- $A$ , es la designación del ambiente, definido anteriormente el de ambiente al que está sometido un elemento estructural (tablas 2.2 y 2.4).

Así, por ejemplo, un hormigón tipificado como  $HA\ 30/B/20\ IIA$ , quiere decir que es un hormigón armado, de  $30\ N/mm^2$  de resistencia mínima, de consistencia blanda, tamaño máximo de árido de  $20\ mm$ , y para un ambiente  $IIA$ , es decir, de humedad alta y ausencia de cloruros.

### 2.1.5. Hormigón armado.

En la arquitectura del último siglo se ha extendido el uso del hormigón armado. Sin él no se hubiese podido reducir espesores y ampliar longitudes de las vigas o pilares y tener mayor libertad en los diseños. El hormigón armado combina una elevada resistencia a compresión del hormigón y la alta resistencia a la tracción debida a las armaduras de acero. Así las estructuras actuales no sólo tienen en cuenta el cálculo de resistencias y estados límites de servicio, diseño y estéticas, sino que además garantiza la vida útil y la durabilidad frente a las acciones físicas y químicas agresivas. Como se ha comentado anteriormente, la vida útil esperada se establece en la actual normativa vigente EHE-08 [8] (tabla 2.1).

El hormigón armado resulta un material sólido, compacto, denso, pero poroso. Realiza sobre la armadura una doble protección como barrera física y de protección química frente a los agresivos, pero esta protección depende de esta red de poros, canales o capilares.

En la figura 2.2 vemos una imagen de una placa de hormigón armado de un elemento constructivo prefabricado.

El hormigón aporta a la armadura una protección química de alta alcalinidad, con un pH alto de 12 y 14, debido principalmente al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento y a los álcalis incorporados como sulfatos en el clínker. Así, con estos valores de pH y con una cantidad limitada de oxígeno, la armadura se encuentra pasivada [17] y en un caso hipotético ideal el acero permanecería estable indefinidamente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04



**Figura 2.2.- Imagen de una placa de hormigón armado.**

## 2.2. Áridos.

Los áridos son materiales inertes procedentes de partículas de roca, de determinadas granulometrías que, unidas con o sin ligante, forman parte de la composición del hormigón y constituyen una parte importante de una estructura. Según su origen el árido puede ser natural, artificial o reciclado, debe estar limpio de polvo y contaminantes, y ser seleccionado reuniendo unas determinadas características de idoneidad.

El árido natural es el que procede de un yacimiento mineral. En cuanto a su forma se distinguen entre redondeados (o rodados) y procedentes de machaqueo. El árido artificial procede de un proceso industrial y ha sido sometido a alguna modificación físico-química o de otro tipo. El árido reciclado es el que resulta del reciclaje de residuos de demoliciones o construcciones y de escombros.

### 2.2.1. Áridos de Canarias.

Debido a la geología del archipiélago, los áridos empleados en Canarias son de origen volcánico. Los usados para la construcción provienen de la disagregación natural de barrancos o, de un uso más extendido, de machaqueo producto de procesos mecánicos industriales, en los que se machacan las rocas volcánicas.

Canarias de origen volcánico y singularidad, constituye un auténtico laboratorio natural para el estudio del fenómeno, ya que aquí se pueden encontrar la gran mayoría de rocas volcánicas que existen en el planeta [18]. Esto hace que sea necesario contar con una clasificación simplificada a unos pocos tipos de rocas o litotipos con propiedades litológicas y comportamiento físico-mecánico similares.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Por este motivo, se ha elegido la clasificación de litotipos volcánicos elaborada por Hernández (2014) [18] por su carácter práctico y funcional; se trata de una clasificación de las rocas volcánicas canarias que reduce a diez grupos de tipos de rocas, o litotipos, diferentes. Esta clasificación tiene por objeto facilitar a los profesionales de la ingeniería y de la arquitectura, con conocimientos limitados de geología, un medio para asignar un nombre a una roca y encuadrarla dentro de un grupo con propiedades físico-mecánicas similares. Esta clasificación se basa en criterios de tipo geológico (litológicos, texturales y de índice de huecos), para conseguir que las rocas de cada grupo tengan un comportamiento geomecánico homogéneo, considerándose los siguientes criterios para su clasificación:

1) Criterio litológico. Se basa en la composición químico-mineralógica de las rocas. En el archipiélago canario la litología dominante es mayoritariamente basáltica en todas las islas. A esto hay que añadir la extraordinaria complejidad geológica de las islas centrales (Gran Canaria y Tenerife) donde además de los materiales mencionados, afloran, en proporción muy importante, rocas de composición intermedia (traquibasaltos) y sálicas (traquitas y fonolitas). Así mismo, es también muy destacable la existencia de ignimbritas de composición fonolítica y con texturas muy variadas en estas dos islas.

2) Criterio textural. Está basado en las características de los minerales formadores de las rocas volcánicas, así como de sus formas y tamaños. Los tipos de texturas presentes en los distintos tipos litológicos son las que se definen a continuación:

a) Afanítica: sin cristales visibles. Está presente en materiales basálticos.

b) Porfídica: con cristales visibles rodeados por una matriz micro o criptocristalina. Presente también en materiales basálticos y en los que los cristales visibles pueden ser de augita y olivino (basaltos olívico-augíticos) o de plagioclasa (basaltos plagioclásicos). También se pueden encontrar olivino como mineral principal observable (picritas), si bien a efectos de definir litotipos, pueden quedar integradas en el grupo de los olívico-augíticos.

c) Traquíctica: es propia de los términos traquílicos y fonolíticos. Así llamada porque es el tipo de textura dominante en la mayoría de rocas de composición traquíctica. Se caracteriza por la presencia de cristales visibles, fundamentalmente de feldespato sódico-potásico, piroxeno o anfíboles, rodeados por una matriz de pequeños cristales orientados o dispuestos al azar (afieltrados), de similar naturaleza.

3) Índice de huecos. Considera la presencia o ausencia de vacuolas en el material rocoso. Dichas vacuolas se corresponden con burbujas de gas contenidas en la lava que, durante su desarrollo y migración hacia la superficie de la colada, quedaron atrapadas tras completarse el proceso de solidificación. En este sentido, existen términos muy vacuolares y términos muy masivos. Sin duda, la presencia y

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

porcentaje de vacuolas en una muestra de basalto condiciona de forma sustancial el comportamiento mecánico de la roca en cuestión y en ese sentido procede considerar este tercer criterio también como elemento diferenciador de litotipos.

Considerando estos tres criterios (litológico, textural e índice de huecos) Hernández (2014) [18]. propone el siguiente cuadro de diez litotipos, válido para la totalidad de unidades rocosas existentes en el archipiélago canario (tabla 2.5).

**Tabla 2.5.- Clasificación de litotipos según Hernández [18].**

	Afanítico (AF)	Masivo (M)	BAFM	
		Vacuolar (V)	BAFV	
Basalto (B)	Olivínico-Piroxénico (OP)	Masivo (M)	BOPM	
		Vacuolar (V)	BOPV	
	Plagioclásico (PL)	Masivo (M)	BPLM	
		Vacuolar (V)	BPLV	
Traquita (TRQ)		TRQ		
Fonolita (FON)		FON		
Ignimbrita (IG)	Soldada	IGS		
	No soldada	IGNS		

Por tanto, los litotipos definidos para el archipiélago canario son los siguientes:

- Basalto afanítico masivo (BAFM).
- Basalto afanítico vacuolar (BAFV).
- Basalto olivínico-piroxénico masivo (BOPM).
- Basalto olivínico-piroxénico vacuolar (BOPV).
- Basalto plagioclásico masivo (BPLM).
- Basalto plagioclásico vacuolar (BPLV).
- Traquita (TRQ).
- Fonolita (FON).
- Ignimbrita soldada (IGS).
- Ignimbrita no soldada (IGNS).

En Canarias los litotipos de más extendida explotación como áridos para hormigones corresponden a fonolitas (FON) y basaltos afaníticos masivos (BAFM). En general, los litotipos BAFM se utilizan en todas las islas del archipiélago, mientras que los FON están restringidos casi exclusivamente a la isla de Gran Canaria.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04



**Figura 2.3.-** Fotos de dos acopios de los áridos (grava 10/20 (izquierda) y arena 0/6 (derecha).

### 2.3. El cemento.

La historia del cemento y el hormigón van de la mano, formando parte de la historia del hombre y de la construcción prácticamente desde su nacimiento. Los conglomerantes tienen un origen milenario, y su evolución y perfeccionamiento técnico están completamente ligados a la del hormigón. Los aglomerantes tienen como la función principal la de ser un pegamento entre los materiales pétreos para formar los distintos aglomerados.

De todos los conglomerantes hidráulicos, el cemento Portland y sus derivados son los de uso más extendido. El cemento Portland se produce mediante la pulverización del clíker (figura 2.4), esencialmente silicatos de calcio hidráulicos, un compuesto básicamente formado por una mezcla en las proporciones adecuadas de caliza, arcilla y yeso que son rocas muy abundantes y de precio relativamente bajo en comparación con otros materiales. La fusión de la mezcla se consigue triturando y tamizando estas materias primas e introduciéndolas en un cilindro en el que se inyecta el combustible pulverizado hasta temperaturas superiores a los 1500 °C.

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 2.4.- Imagen de piedras de Clínker.**

Los cementos que estén de acuerdo a la norma UNE EN 197-1 (2011) [19] son denominados cementos CEM, y deben ser capaces, cuando se dosifican y mezclan apropiadamente con áridos y agua, de producir un hormigón o un mortero que conserve su trabajabilidad durante un tiempo suficiente y de alcanzar después de unos periodos definidos, los niveles especificados de resistencia. También deben tener estabilidad de volumen a largo plazo.

El endurecimiento hidráulico del cemento CEM se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos como, por ejemplo, los aluminatos.

La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ) y de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) en el cemento CEM debe ser al menos del 50% en masa, cuando las proporciones se determinen de acuerdo con la Norma EN 196-2 [20].

### 2.3.1. Componentes del cemento.

El cemento está formado por los siguientes componentes principales:

#### a.- Clínker de cemento Portland (K).

El clínker de cemento Portland es un material hidráulico que debe estar constituido, al menos en dos tercios de su masa, por silicatos de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  y  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio e hierro y por otros compuestos. La relación en masa óxido de calcio/óxido de silicio no debe ser menor de 2,0 ( $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) > 2$ ). El contenido de óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) no debe exceder del 5,0% en masa. Se obtiene por sinterización de una mezcla

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

especificada con precisión de materias primas (crudo, harina o pasta) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y pequeñas cantidades de otros materiales. El crudo, harina o pasta, se divide finamente y se mezcla íntimamente para obtener un producto homogéneo. El clínker de cemento Portland incorporado en los cementos Portland resistentes a los sulfatos (CEM I) y en los cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos (CEM IV) debe cumplir unos requisitos adicionales para el contenido de aluminato tricálcico (C3A). Los cementos Portland resistentes a los sulfatos y los cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos se elaboran con clínker de cemento Portland en el cual el contenido de C3A no excede del 0%, 3% o 5%, para CEM I, según corresponda, y del 9% para CEM IV/A y CEM IV/B.

### b.- Escoria granulada de alto horno (S).

La escoria granulada de alto horno se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un alto horno y constituida, al menos en dos tercios de su masa, por escoria vítrea y posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada.

La escoria granulada de alto horno debe estar constituida, al menos en dos tercios de su masa, por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). El resto contiene óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) junto con pequeñas cantidades de otros compuestos. La relación en masa (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub>) debe ser superior a 1,0.

### c.- Materiales puzolánicos (P, Q), entre los que destacan la Puzolana natural (P) y la Puzolana natural calcinada (Q).

Son materiales naturales o artificiales, que contienen fundamentalmente silicio, o silicio y aluminio (el conjunto sílice más álumina varía a menudo entre el 70 y el 80%). Esto les da un carácter ácido y, por tanto, una gran afinidad por la cal. Están compuestos de fase vítrea en su mayor parte, siendo la fase cristalina muy pequeña, lo que hace que sean materiales de alta reactividad. La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño. Sin embargo, finamente molida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido cálcico a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en el agua y que poseen características cementantes, es decir capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

Bajo el nombre de puzolanas se incluyen productos que son bastante diferentes en cuanto a su origen, estructura, composición química y mineralógica y que tienen en común lo que se denomina "actividad puzolánica", objeto del apartado 2.5.2.

---

26

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

#### d.- Ceniza volante silícea (V) o volante calcárea (W).

La ceniza volante, o *fly ash*, se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. La importancia de este residuo o subproducto es significativa, ya que se producen de 30 a 300 gramos de cenizas volantes por kWh. Así, una central térmica puede generar hasta 2000 toneladas de cenizas volantes por día.

La ceniza volante es un polvo fino, de partículas esféricas en su mayoría. Puede ser de naturaleza silícea o calcárea.

La ceniza volante silícea:

- tiene propiedades puzolánicas.
- Consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), siendo el resto óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.
- La proporción de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ) debe ser menor del 10,0% en masa, y el contenido de óxido de calcio libre no debe exceder del 1,0% en masa. También es aceptable la ceniza volante con un contenido de óxido de calcio libre superior al 1,0% en masa pero inferior al 2,5% en masa, con la condición de que el requisito de expansión (estabilidad de volumen) no sobrepase los 10 mm cuando se ensaye de acuerdo con la Norma EN 196-3 [21], utilizando una mezcla de un 30% en masa de ceniza volante silícea y un 70% en masa de un cemento CEM I conforme con la Norma EN 197-1 [19].
- El contenido de dióxido de silicio reactivo no debe ser inferior al 25% en masa.

La ceniza volante calcárea:

- es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.
- Consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), siendo el resto óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.
- La proporción de óxido de calcio reactivo no debe ser menor del 10,0% en masa. La ceniza volante calcárea que contenga entre el 10,0% y el 15,0% en masa de óxido de calcio reactivo debe tener un contenido no inferior al 25,0% en masa de dióxido de silicio reactivo.

La pérdida por calcinación de la ceniza volante determinada de acuerdo con la Norma EN 196-2, pero empleando un tiempo de calcinación de 1 h, se debe encontrar dentro de alguno de los siguientes límites:

- 0% a 5,0% en masa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

- 2,0% a 7,0% en masa.
- 4,0% a 9,0% en masa.

### e.- Esquisto calcinado (T).

El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800 °C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases del clíker, principalmente silicato dicálcico y aluminato monocálcico. También contiene, además de pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio, mayores proporciones de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas pronunciadas, como las del cemento Portland, así como propiedades puzolánicas.

### f.- Caliza (L, LL).

La caliza debe cumplir los siguientes requisitos:

#### Caliza (L) - Especificaciones:

- $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masa, calculado a partir del contenido de óxido de calcio.
- Contenido de arcilla < 1,20 g/100 g, determinado mediante el ensayo del azul de metileno de acuerdo con la Norma EN 933-9 [22]; no debe exceder de 1,20 g/100 g. Para este ensayo, la caliza debe estar molida a una finura aproximada de 5 000 cm<sup>2</sup>/g, determinada como superficie específica de acuerdo con la Norma EN 196-6 [23].
- Contenido de carbono orgánico total (TOC) ≤ 0,50% en masa.

#### Caliza (LL) - Especificaciones:

- $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masa, calculado a partir del contenido de óxido de calcio.
- Contenido de arcilla < 1,20 g/100 g, determinado mediante el ensayo del azul de metileno de acuerdo con la Norma EN 933-9 [22]; no debe exceder de 1,20 g/100 g. Para este ensayo, la caliza debe estar molida a una finura aproximada de 5 000 cm<sup>2</sup>/g, determinada como superficie específica de acuerdo con la Norma EN 196-6 [23].
- Contenido de carbono orgánico total (TOC) ≤ 0,20% en masa.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### **g.- Humo de sílice (D).**

El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, en la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas que contienen al menos un 85% en masa de dióxido de silicio amorfo. El contenido de silicio elemental (Si), determinado de acuerdo con la Norma ISO 9286 [24], no debe ser superior al 0,4% en masa.

El humo de sílice debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) La pérdida por calcinación no debe exceder el 4,0% en masa, determinada de acuerdo con la Norma EN 196-2 [20] pero empleando un tiempo de calcinación de 1 h.
- b) La superficie específica (BET) del humo de sílice no tratado debe ser, al menos, de 15,0 m<sup>2</sup>/g, cuando se ensaya de acuerdo con la Norma ISO 9277 [25].

A parte de estos componentes principales, están presentes otros compuestos minoritarios consistentes en materiales minerales inorgánicos naturales o materiales minerales inorgánicos derivados del proceso de fabricación del clínker, o alguno de los componentes especificados como principales, a menos que ya estén incluidos como componentes principales del cemento.

Estos componentes minoritarios pueden ser inertes o presentar propiedades ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. Pueden mejorar las propiedades físicas del cemento después de una adecuada preparación y en función de su granulometría.

### **2.3.2. Designación de los cements.**

El clínker, una vez enfriado, es molido de nuevo y, según el tipo de cemento que se vaya a fabricar, se le añade una o varias adiciones. Según la Instrucción para la recepción de cements (RC-08) [26], en España los cements están sujetos al marcado CE, y se clasifican e identifican según la tabla 2.6, agrupándose en cinco tipos principales tal y como se indica a continuación:

- CEM I Cemento Portland.
- CEM II Cemento Portland compuesto.
- CEM III Cemento de alto horno.
- CEM IV Cemento puzolánico.
- CEM V Cemento compuesto.

La composición de cada uno de los productos de la familia de los cements comunes debe estar de acuerdo con la tabla 2.6. Por razones de claridad en la definición, los requisitos para la composición se refieren a la suma de todos los

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

componentes principales y minoritarios adicionales. Se sobreentiende que el cemento final es la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales más el sulfato de calcio necesario y cualquier aditivo.

La designación del cemento Portland se designará con las siglas CEM I, seguidas de la clase de resistencia (32,5 - 42,5 - 52,5) y de la letra (R) si es de alta resistencia inicial o de (N) si es de resistencia inicial normal.

Los cementos Portland con adiciones se designarán con las siglas CEM II seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A o B) separada por un guión (-) de la letra identificativa del componente principal empleado como adición del cemento: (S) escoria de alto horno, (D) humo de sílice, (P) puzolana natural, (Q) puzolana natural calcinada, (V) ceniza volante silícea, (W) ceniza volante calcárea, (T) esquistos calcinados, (L y LL) caliza. A continuación, se indicará la clase de resistencia (32,5 - 42,5 - 52,5), y seguidamente la letra R si se trata de un cemento de alta resistencia inicial o la letra N en el caso de ser de resistencia inicial normal.

También existen cementos especiales, como los de bajo calor de hidratación, cementos de escorias de alto horno de baja resistencia inicial, cementos especiales de muy bajo calor de hidratación, cemento de aluminato de calcio, cementos de albañilería, cemento de albañilería blanco, cementos resistentes a los sulfatos cementos para usos especiales.

Los cementos de uso más extendido en Canarias son en su mayoría cementos Portland con puzolana. Los hormigones, pastas de cementos y morteros ensayados en este trabajo han sido fabricados con cementos CEM II/A-P 42,5 R, CEM II/A-P 32,5 R, CEM IV/B-P 32,5 y II/A-P 42,5 R/MR.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 2.6.-** Cementos comunes según la RC-08 [26].

Tipo	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa) <sup>1)</sup>											
			Clinker			Puzolana			Cenizas volantes			Esquistos calcinados		
			K	Escoria de Hornillo S	Humo de silice 2)	Natural D	P	Natural Calcinada Q	Siliceas V	W	Calcáreas T	R	L	LL
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de silice	CEM II/A-D	90-94	-	06/10/15	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con puzolanas	CEM II/A-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con cenizas volantes	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	-	-	6-20 21-35	-	6-20 21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquistos calcinados	CEM II/A-T CEM II/B-T	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L CEM II/B-L CEM II/A-LL CEM II/B-LL	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland compuesto 3)	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III	Cemento con escorias de alio hornillo	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico 3)	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	-	( 11-35 ----- ) ( 36-55 ----- )	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM V	Cemento compuesto 3)	CEM V/A CEM V/B	40-64 20-38	18-30 31-50	-	( 18-30 ----- ) ( 31-50 ----- )	-	-	-	-	-	-	-	0-5

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).

2) El porcentaje de humo de silice está limitado al 10%.

3) En cementos Portland mixtos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM V/A y CEM V/B los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la designación del cemento (véase el apartado A.1.2).  
4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme a UNE EN 13639, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 2.3.3. Reacciones del cemento.

El proceso de hidratación del cemento Portland es bastante complejo y depende de varios factores. La reacción de hidratación del cemento Portland puede simplificarse, sin tener en cuenta la estequiometría ni las fases aluminosas, de la siguiente manera:



donde:

- CSH son los silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida.
- CH es la Portlandita procedente de la reacción de hidratación del cemento.

En esta ecuación  $\text{SiO}_2\text{2CaO}$  y  $\text{SiO}_2\text{3CaO}$  (silicatos bicálcico y tricálcico) son los componentes principales del cemento Portland, y CSH y CH (hidróxido de calcio,  $\text{CaOH}$ ) son los productos de la reacción. Mientras que el CSH podría definirse como el pegamento del cemento, y principal responsable de su resistencia e impermeabilidad, el CH no tiene valor cementante y se disuelve fácilmente en medios agresivos.

La principal aportación de este compuesto es la de mantener un ambiente alcalino ( $\text{pH}$  alto) que ayuda a proteger de la corrosión las armaduras en el cemento armado. La capacidad cementante de estos compuestos es debida, entre otras cosas, a su estructura atómica. El CSH posee una estructura altamente amorfía, con gran cantidad de ramificaciones que al entrecruzarse unas con otras forman un conjunto sólido, salpicado por partículas de CH, cristalinas, y que suponen puntos de ruptura del entramado amorfó, creando puntos débiles en la estructura global.

### 2.4. Cementos: aditivos y adiciones.

La producción de cementos con adiciones es ya una práctica común en la Industria del Cemento a nivel mundial.

Las razones que justifican la utilización de adiciones pueden ser de tipo económico, tecnológico y ecológico. Las razones económicas obedecen, por un lado, al uso de subproductos desecharados de la industria que todavía contienen materia y energía potencialmente recuperables y de menor costo y, por otro lado, a un ahorro en materias primas y a un ahorro energético que se origina por la sustitución de una determinada cantidad de clínker por adiciones. Este ahorro energético nos conduce a un tipo de ahorro ecológico ya que se reduce la emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera y, por otro lado, la utilización de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes de centrales termoeléctricas reduce su eliminación por acumulación en escombreras. Las razones técnicas se centran en el hecho de que un cemento con

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

adiciones presenta un mejor comportamiento respecto a durabilidad e incluso es mecánicamente más resistente, en determinadas ocasiones, que los cements exentos de ellas [27]. Actualmente priman más las razones de carácter económico-ecológico frente a las técnicas, que fueron las primeras en ser desarrolladas. Las adiciones se presentan como un medio fácil y viable y con amplias perspectivas de reducir el costo de fabricación de cementos.

#### **2.4.1. Aditivos.**

Los aditivos, para el propósito de la Norma EN 197-1 [19], son componentes que se añaden para mejorar la fabricación o las propiedades del cemento.

La cantidad total de aditivos no debe superar el 1,0% en masa del cemento (a excepción de los pigmentos). La cantidad de aditivos orgánicos, medida sobre el residuo seco, no debe exceder del 0,2% en masa del cemento. Se puede añadir una cantidad mayor en los cements siempre y cuando se declare la cantidad máxima, en %, en el envase y/o albarán.

Estos aditivos no deben causar la corrosión de las armaduras ni perjudicar las propiedades del cemento ni de los morteros y hormigones con él fabricados.

Cuando se usan en el cemento aditivos para hormigones, morteros o pastas conformes con la serie de Normas EN 934, debe declararse la designación normalizada del aditivo en los sacos o en los albaranes.

#### **2.4.2. Adiciones.**

Las adiciones para hormigón son materiales de naturaleza inorgánica que destacan por sus características puzolánicas o hidráulicas; finamente molidos, pueden ser añadidos al hormigón a fin de mejorar sus propiedades o dotarlo de especiales características [8].

La instrucción EHE-08 recoge como definición de adiciones "aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales".

De una forma simplificada, las adiciones se pueden clasificar como activas e inertes.

Las adiciones activas reaccionan con los productos de hidratación del clínker sin variar mucho la resistencia, mientras que las inertes no aportan resistencia. Si tienen una elevada finura, mejoran la homogeneidad. Por el contrario, pueden

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

reducir la durabilidad del hormigón ya que las reacciones de algunas adiciones con el hidróxido de calcio provocan una pérdida de pH alcalino y la despasivación de las armaduras.

Las adiciones minerales más usualmente empleadas son:

- Escoria granulada de alto horno (S), que se obtiene por enfriamiento rápido en estado de fusión del mineral de hierro en un alto horno.
- Puzolanas (P, Q), son sustancias naturales (P) o industriales (Q) silíceas o silico-aluminosas. Finamente molidas, reaccionan con la Portlandita y forman compuestos silicoaluminatos cáticos hidratados (C-S-A-H), capaces de desarrollar resistencia.
- Esquisto calcinado (T), contiene fases del clínker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico (hidráulico y puzolánico).
- Caliza (L, LL), molida finamente actúa como filler.

La instrucción EHE-08 recoge únicamente la utilización de las cenizas volantes y el humo de sílice como adiciones al hormigón en el momento de su fabricación. En ella se definen las cenizas volantes como los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

El humo de sílice es un subproducto que se origina en la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio.

Las adiciones pueden utilizarse como componentes del hormigón siempre que se justifique su idoneidad para su uso, produciendo el efecto deseado sin modificar negativamente las características del hormigón, ni representar peligro para la durabilidad del hormigón, ni para la corrosión de las armaduras. Así, dicha instrucción recoge las condiciones que han de darse para que ambos materiales puedan ser empleados como adiciones en hormigones, contemplando únicamente el uso de cemento del tipo CEM I.

Dentro de los cementos con adiciones activas, el más antiguo que se conoce es el cemento puzolánico, que se remonta a la civilización romana, con el descubrimiento de las cenizas volcánicas de la región de «Puzzuoli» en Nápoles, tal y como se comentó anteriormente. De ahí el término de puzolana que se emplea en la actualidad para denominar a todos los materiales que tienen capacidad para reaccionar con la cal en presencia de agua y a temperatura ambiente para formar productos con propiedades hidráulicas [28,29].

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Con el incremento progresivo de la producción y empleo de los cementos con adiciones puzolánicas, y teniendo en cuenta la diversidad de estas adiciones, se ha hecho necesario intensificar las investigaciones relacionadas con los métodos de ensayo para evaluar su calidad junto con el conocimiento de sus propiedades [30-33].

La actividad puzolánica es la propiedad fundamental de estos materiales, pero para la selección de una puzolana se debe considerar, entre otros factores, su composición mineralógica, que influye no sólo en los constituyentes activos, sino también en la avidez por el agua, lo cual se relaciona directamente con la resistencia de morteros y hormigones, su trabajabilidad, fisuración por secado y otras propiedades.

#### **2.4.3. Cemento y medio ambiente.**

La producción de cemento es una de las industrias que más cantidad de energía consumen en todo el mundo. Es, junto con la industria siderúrgica, la petrolera, la química y la papelera, la responsable del consumo del 50% de la energía primaria, y a su vez del 53% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>. Específicamente las industrias cementeras absorben el 2% del consumo total de energía y un 5% de la energía industrial a nivel mundial. Un ahorro en la producción de cemento implicaría una disminución considerable de la emisión de CO<sub>2</sub> y es en esa vía donde se están concentrando los esfuerzos.

La producción de una tonelada de cemento requiere en torno a 4 GJ, mientras que la producción de una tonelada de clíker requiere un mínimo de 1,6 GJ de calor [34], situándose el consumo medio en una planta bien acondicionada en torno a 2,95 GJ por tonelada de cemento producido [35] y, en el caso opuesto, un consumo de 5 GJ por tonelada en plantas de producción menos eficientes, como es el caso de China, donde el consumo medio es de 5,4 GJ por tonelada de cemento [36].

Desde el punto de vista medioambiental y respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, el sector de materiales de construcción es el tercer mayor emisor de CO<sub>2</sub> del sector industrial en todo el mundo, incluida la Unión Europea [37]. Este sector representa el 10% del total de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, la mayoría de los cuales están relacionados con la fabricación de hormigón [38]: aproximadamente el 85% de estas emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la producción de cemento [39]. A su vez, de este 85%, un 95% de las emisiones de CO<sub>2</sub> son debidas al proceso de producción de cemento en sí, mientras que el 5% restante es debido al proceso de transporte de materias primas y productos terminados [40].

Se estima que cerca de un 5-6% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> provienen de la manufactura del cemento [41,42]. Este dióxido de carbono procede de dos fuentes principales: la primera es directamente de la descomposición de la piedra

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento:	927280	Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha:	08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) para formar óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), la cual aporta casi el 50% del  $\text{CO}_2$  total, y la segunda directamente de la quema de combustible, bien sea directamente en el horno rotatorio utilizado para la obtención del clínker (35% aprox.), bien sea indirectamente en las centrales térmicas para generar la energía eléctrica necesaria (15% aprox.) [43-47]. Hay varios factores que influyen en la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitido, como las particularidades de cada proceso productivo, los diferentes combustibles utilizados, la eficiencia energética o el contenido de clínker en el cemento, pero se puede estimar una emisión media de entre 0,81-0,89 kg de  $\text{CO}_2$  por kg de cemento producido. La IEA ha calculado que la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitido por tonelada de cemento en España es de 0,65 kg  $\text{CO}_2$ /kg cemento en 2007 [42].

Debido a estos elevados niveles de emisión de  $\text{CO}_2$ , muchos de los estudios realizados en los últimos tiempos estén centrados en la reducción de producción de dicho gas, así como en la comparación de las opciones de mejora de eficiencia energética a las variaciones esperadas en la producción de cemento [34,48-50]. Este esfuerzo en reducir la emisión de  $\text{CO}_2$  está englobado dentro de los objetivos globales sostenibles, tales como los del Grupo Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), que tiene como objetivo reducir las emisiones de los países desarrollados por un factor de cuatro en 2050 a fin de alcanzar una reducción global del 50% (con respecto a los niveles de 1990). Este impacto será, evidentemente, más importante para las industrias con grandes emisiones de  $\text{CO}_2$ , como la industria del cemento, en el que podría ser tan alta como 50% de los costes de producción [51].

Tal y como se comentó anteriormente, la producción del clínker consume gran cantidad de energía. La sustitución parcial del clínker por otros productos tales como puzolanas, cenizas y otros productos residuales, estandarizados por normas europeas [19], conduce a una reducción en las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

#### 2.4.4. Producción de cemento.

Durante 2016 fueron producidas alrededor de 4200 millones de toneladas métricas de cemento Portland en todo el mundo [52]. China destaca sobre todos los países como principal productor, con casi el 50% de esta producción mundial (unos 2410 millones de toneladas métricas), lo que da una idea del proceso de expansión que está viviendo este país. Le siguen muy de lejos la India (290 millones de toneladas métricas) y Estados Unidos (85,9 millones de toneladas métricas).

La producción de cemento en España ha sufrido un fuerte descenso en los últimos años con motivo de la fuerte crisis que afecta al país, con una ligera recuperación en los últimos años. Como dato a destacar, España ocupó en 2006 la primera posición mundial en consumo de cemento per capita, con 1278 kg/habitante, mientras que otros países como México ocupa el lugar nº 18 en esta lista, y Brasil el nº 22 con 334 y 219 kg/habitante respectivamente, por detrás de países como Italia,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

Grecia o Francia, con poblaciones mucho menores y necesidades habitacionales también mucho menores.

El consumo de cemento en España cerró 2016 en 11140639 toneladas, un 3,1% menos que en 2015, lo que supone una caída de más de 350000 toneladas respecto al ejercicio anterior [53]. Las cifras de diciembre no fueron mejores y se situaron en 804372 toneladas, con un descenso del 3,8% respecto al mismo mes del año anterior. Las exportaciones han paliado, aunque solo en parte, la caída del mercado doméstico, con un crecimiento del 5,6%, que ha permitido alcanzar las 9782631 toneladas. España cuenta con un coste eléctrico (la partida con mayor impacto sobre el coste de producción del cemento) de los más elevados de Europa, lo que reduce notablemente el margen de maniobra de la industria española frente a los países de nuestro entorno. El coste en aumento de la energía que venimos sufriendo en los últimos meses, podría poner además en peligro la posición de liderazgo de nuestro país, que en la actualidad se sitúa a la cabeza de la Unión Europea en exportación, tanto intra como extra comunitaria.

Se estima que el sector crecerá menos del 1% en el 2017. No obstante, estas cifras dependen en gran medida de que se cumpla la esperada evolución en positivo de la edificación residencial, ya que la inversión en infraestructura pública se verá mermada por la contención del gasto público.

## 2.5. Adiciones de materiales puzolánicos.

### 2.5.1. Generalidades.

Los materiales puzolánicos son sustancias naturales de composición silícea o sílico-aluminosa o una combinación de ambas.

No es tarea sencilla el establecer una clasificación precisa de las puzolanas, ya que bajo esta denominación se abarcan materiales de distintos orígenes y composiciones, tanto química como mineralógica, encontrándose en la bibliografía distintas clasificaciones [54-59]. Existen distintos sistemas de clasificación para las puzolanas basados en distintos criterios. Sistemas según su composición química, según su composición mineralógica, según sus propiedades físicas, según su reactividad, pero el sistema más comúnmente utilizado es aquel que clasifica a las puzolanas según su origen, natural o artificial.

Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas. Éstas se subdividen, a su vez, en función de su origen como: volcánicas, no volcánicas o mixtas.

Las puzolanas volcánicas son puzolanas naturales de origen mineral surgidas de erupciones volcánicas explosivas depositándose en los alrededores del volcán. En

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		

función de la viscosidad, de la velocidad de enfriamiento y del contenido de gases del magma fundido original surgen: Las cenizas, la piedra pómex, las escorias y las bombas. Dentro de ellas, además, se distinguen otras dos subclases: materiales incoherentes y tobas volcánicas. Los materiales incoherentes se transforman en rocas compactas llamadas tobas debido a transformaciones químico-mineralógicas que influyen directamente en el comportamiento puzolánico de estos materiales, mientras que las tobas volcánicas, tufo volcánico o tuff surgen por combinación de los depósitos de puzolanas con estratos compactos. Posteriormente a causa de la meteorización atmosférica se pueden dar fenómenos de zeolitización (proporcionando al material propiedades puzolánicas) o de argilización (reduciendo la puzolanicidad del material).

El otro subgrupo de puzolanas naturales lo componen materiales no volcánicos procedentes de rocas de simple depósito como las arcillas y la sílice amorfa, también llamada sinter de sílice o sílice-geo (origen sedimentario) o las tierras de diatomeas, compuestas de esqueletos silíceos de microorganismos, depositados en el agua del mar (origen orgánico).

Por último, nos encontramos con materiales de origen mixto (rocas híbridas) procedentes de rocas compuestas estratificadas de distinto origen (volcánico, sedimentario y orgánico).

Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan, a temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para formar compuestos de silicato de calcio y de aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos. Tal y como se comentó anteriormente, las puzolanas están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros óxidos. La influencia de la proporción del óxido de calcio reactivo es despreciable para el endurecimiento. El contenido de dióxido de silicio reactivo no debe ser menor del 25,0% en masa.

Los materiales puzolánicos deben prepararse correctamente, es decir, deben ser seleccionados, homogeneizados, secados o tratados térmicamente y pulverizados, dependiendo de su estado de producción o de suministro.

### 2.5.2. Actividad puzolánica.

La actividad puzolánica es la propiedad fundamental de estos materiales, la cual está referida a la cantidad de Portlandita ( $\text{CH}$ ) que es capaz de reaccionar con los componentes activos de la puzolana (aluminatos y silicatos) y a la velocidad en que estas reacciones se producen. Para su selección se deben considerar, además, otros factores como su composición mineralógica, la cual influye no solo en los

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

constituyentes activos sino también en la avidez por el agua, lo cual está directamente relacionado con la resistencia de morteros y hormigones, su trabajabilidad, fisuración por secado y otras propiedades. La actividad se ve influenciada por el contenido en material vítreo, la composición químico-mineralógica, la superficie específica y la tensión producida por las inclusiones cristalinas de las puzolanas.

La denominada reacción puzolánica es principalmente la que se da entre el óxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ), la cal o hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$  (Portlandita CH)) y el agua, para producir silicatos de calcio hidratados (CSH). Es una reacción equivalente a la que se da en el cemento Portland y se obtiene un producto muy similar. Además de esta reacción se producen otras secundarias, como la que da como resultado el aluminato de calcio (C3A).

La reacción puzolánica puede representarse de la siguiente manera:



donde:

- CSH son los silicatos de calcio hidratados de estequiométría no definida.
- CH es la Portlandita procedente de la reacción de hidratación del cemento.

Los productos formados tras la reacción puzolánica son similares a los obtenidos en la reacción de hidratación del cemento Portland, siendo el CSH (silicato cárneo hidratado) el componente más habitual, aunque con una relación Ca/Si más baja, junto con fases de aluminatos cárneos hidratados.

Por tanto, si se adiciona cierta cantidad controlada de puzolana dentro del cemento Portland ésta reaccionaría con el CH producto de la hidratación provocando la reducción de fases no deseadas y transformándolas en otras que contribuirían al aumento de su resistencia. La nucleación del CH alrededor de las partículas de puzolana, más finas, y distribuidas por toda la red reemplazará los cristales de CH (grandes y orientados) por otros cristales (mucho más pequeños y amorfos) procedentes de la reacción puzolánica. Hay que tener en cuenta que si el consumo de CH resulta excesivo puede derivar en un problema de autoneutralización debido al desequilibrio creado entre los elementos de reacción, pudiendo conducir a la destrucción parcial de la matriz. Este efecto sería especialmente grave en el caso concreto del hormigón armado, ya que favorecería la corrosión del acero.

Para poder comprender mejor las reacciones puzolánicas debemos tener en consideración los procesos involucrados en la hidratación del cemento Portland descritos previamente, donde a partir de una serie de reacciones químicas entre los componentes del clínker, el sulfato cárneo y el agua se produce el fraguado y

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

endurecimiento de la pasta de cemento. Los productos de reacción de la hidratación del cemento son el silicato cálcico hidratado (CSH), la Portlandita (CH) y aluminatos cálcicos hidratados (C4AH19, polimorfo del C4AH13, C2AH8 y C3AH6).

La utilización de puzolanas en el cemento provoca la sustitución de un producto no hidráulico, soluble y pernicioso, como es la Portlandita, por productos hidráulicos y resistentes, resultantes de la reacción puzolánica, como los silicatos cálcicos hidratados (tobermorita, CSH), los aluminatos hexagonales, tipo C4AHx, carboaluminatos, gelenita hidratada (C2ASH8), compuestos de la familia de los hidrogenantes, etc. [60,61]. La tobermorita (silicato cálcico hidratado, CSH) es la principal responsable de la unión y resistencia de la pasta de cemento. Por lo que un aumento en la tobermorita formada por la acción puzolánica (tobermorita secundaria) sobre la formada directamente por la hidratación de los silicatos de clínker (primaria) dará lugar a un aumento de la resistencia mecánica, sobre todo a medio y largo plazo, debido a que las reacciones puzolánicas suelen ser lentas.

Por otra parte, la formación de tobermorita secundaria confiere a la pasta de cemento una mayor resistencia química, por dos motivos: por un lado, la Portlandita es más soluble en agua y atacable por medios ácidos que la tobermorita, la cual es menos susceptible al deslavado y arrastre, y por otro la formación de geles de tobermorita secundaria contribuye a densificar la pasta de cemento, no sólo disminuyendo la porosidad total, aunque en algunos casos ésta puede incluso aumentar levemente, sino además produciendo un incremento de la proporción de microporos, en detrimento de los mesoporos y macroporos. Este hecho es favorable, ya que los microporos están menos intercomunicados, con lo que son más impenetrables, de modo que la pasta de cemento se hace más impermeable al agua y a las disoluciones iónicas agresivas (cloruros y sulfatos), así como a la penetración de iones por difusión. Estudios realizados [62] ponen de manifiesto que las pastas de cemento puzolánico son diez veces menos penetrables a los iones cloruro que las realizadas con cemento Portland sin puzolana.

La incorporación de fases activas al cemento Portland mejora las prestaciones de las matrices resultantes [60], debido al efecto filler, cuyas partículas actúan como puntos de formación de las fases hidratadas del clínker, y al efecto puzolánico, que hace que las partículas formadas durante la reacción puzolánica pasen a llenar los huecos producidos por el exceso de agua dando lugar a variaciones en la estructura porosa y en la distribución de los tamaños de poro.

Además de los efectos derivados de la componente química de la adición son igualmente importantes aquellos derivados de la componente física, relacionados con su tamaño de partícula y su superficie específica. Aunque depende del tipo de puzolana y del proceso de molienda (en su caso) éstas presentan generalmente tamaños de grano muy pequeños, esto es, una gran superficie específica. Estas partículas minúsculas se introducen en la red creada por el cemento, situándose entre sus granos y desarrollando sus propios filamentos de

---

40

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

gel, y promoviendo una mayor compacidad de la mezcla que da como resultado una menor porosidad y por tanto una mayor resistencia e impermeabilidad.

También las puzolanas intervienen en el proceso de liberación del calor de hidratación que se produce durante el fraguado. La reacción de hidratación del cemento es un proceso altamente exotérmico, con una gran cantidad de calor liberado en muy poco tiempo, y por tanto muy inestable. La presencia de puzolanas ralentiza este proceso, alargando el tiempo de fraguado y haciendo la reacción mucho más estable, y en consecuencia menos vulnerable a los ataques.

Según lo expuesto anteriormente, las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan, principalmente, de tres características de la reacción puzolánica.

1. La primera es que es una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos.
2. La segunda es que es una reacción que consume hidróxido de calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.
3. La tercera es que al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción llenan, de forma muy eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento. Así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánica del sistema (menor porosidad).

### **2.5.3. Puzolanidad y reactividad puzolánica.**

Estos dos términos son básicos a la hora de analizar las cualidades de un material para formar compuestos cementantes mediante la reacción puzolánica. Como se ha descrito, los factores que determinan la puzolanidad de un compuesto son su contenido en sílice amorfa (una baja cristalinidad, y por tanto una estructura netamente amorfa resulta un factor crítico para que la puzolana resulte reactiva) y su tamaño de partícula. Ahora bien, no todos los compuestos que posean estas características similares se comportan de la misma manera, sino que su capacidad vendrá determinada por su reactividad.

Existen varios métodos para evaluar esta reactividad, no resultando ninguno de ellos concluyente al 100% a la hora de evaluar las bondades de una puzolana para su uso como adición activa. Es por esto que resulta recomendable la combinación de varios de estos métodos para una correcta selección.

1. *Medida de la reducción de contenido de CH con el tiempo;* la desaparición paulatina de la cal indica que ha reaccionado de alguna manera, y se ha

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

combinado para formar otros compuestos. Si bien esta observación no es definitiva para asegurar un aumento de la resistencia, sí lo es en sentido negativo para descartar aquellas combinaciones en las que no se produzca dicha reducción.

2. *Medida de la reducción de poros capilares con el tiempo;* los productos de la reacción deben precipitarse alrededor de los granos ocupando espacios vacíos entre los granos de cemento. Según avanza la reacción estos productos se expanden evitando la formación de poros capilares e incluso cerrando parte de los ya formados. Puede darse una disminución del contenido de CH y no observarse una reducción significativa de la porosidad de la matriz, lo que podría entenderse como una reacción insuficiente. Este es un método que puede orientar la investigación en uno u otro sentido, pero nunca resultar definitivo.
3. *Observación microscópica;* mediante la utilización del microscopio electrónico puede observarse la formación de los productos de reacción gracias a su morfología característica. Al igual que el primero de los métodos descritos éste puede considerarse sólo definitivo en caso negativo, si no se observan los productos esperados se puede descartar la mezcla.
4. *Medida del aumento de la resistencia mecánica;* éste puede considerarse como la evidencia más fiable de que realmente se ha producido la reacción, además de tratarse de la verificación definitiva de si se han logrado o no los objetivos, al menos en parte.

Todos estos métodos deben evaluarse teniendo en cuenta la menor velocidad de la reacción puzolánica, por lo que es necesario realizar comprobaciones intermedias y dar a las muestras el suficiente tiempo para desarrollar la reacción (al menos 28 días).

#### **2.5.4. Humo de sílice.**

El humo de sílice es un material que consiste esencialmente de sílice no cristalina con una elevada área superficial (200000-250000 cm<sup>2</sup>/g), que es enorme en comparación con los 3000 cm<sup>2</sup>/g del cemento Portland. Está compuesto de esferas diminutas con un tamaño medio de partícula de 0,1 micras. Esta es la razón de sus altas propiedades puzolánicas generando, sin embargo, problemas de almacenamiento y manipulación.

Su composición química depende del tipo de aleación de silicio que ha sido procesada en el horno eléctrico de arco. Los subproductos de la industria del silicio metal o del ferrosilicio (Si > 75%) contienen del 85 al 95% de sílice no cristalina, mientras que los de la industria del ferrosilicio con un 50% de Si contienen una cantidad mucho más bajo de sílice no cristalina y, por tanto, son menos puzolánicos. Sin embargo, para

Identificador del documento:	927280	Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

cada tipo de producción, esta composición química es muy constante debido al hecho de que los materiales usados para la fabricación del silicio o sus aleaciones son muy puros. La diferencia más importante se encuentra en el contenido en óxido de hierro, más alto para las aleaciones de ferrosilicio que para el silicio. Los contenidos en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO y álcalis son muy bajos.

El humo de sílice, debido a su finura, puede llenar los espacios intergranulares del cemento, reduciendo así el tamaño de los poros. Existe sin embargo una seria dificultad para obtener este efecto granular. Las partículas de sílice son floculadas por los iones calcio liberados por el cemento, a causa de su gran energía de superficie y de su elevada área superficial, esto hace que aumente de forma apreciable la demanda de agua en el hormigón, a menos que se use un aditivo reductor de agua (fluidificante, superplastificante, etc), lo que impide la aglomeración de las partículas.

El efecto granular del humo de sílice ha sido puesto en evidencia por investigadores que han comparado el efecto del humo de sílice y el de las partículas esféricas de negro de humo, químicamente inertes, de superficie específica y de granulometría casi idénticas. Las resistencias mecánicas del hormigón de referencia, del hormigón conteniendo 10% de humo de sílice o 10% de negro de humo no son significativamente diferentes a 7 días. A 28 días, sólo la resistencia del hormigón con adición de humo de sílice es diferente de las otras dos. Aquella es netamente superior.

Se ha mostrado que la función física de los finos adicionados compensa la reducción del contenido en cemento. La explicación es la siguiente: más que una función de "tapa-agujeros", estas partículas son lugares privilegiados de nucleación para los productos de hidratación del cemento. En lugar de grandes granos bien orientados, se forman numerosos cristales pequeños orientados al azar. Éste sería el mecanismo físico del afino de los granos de hidratos (formados en los lugares de nucleación privilegiados), que compensaría la reducción del contenido en cemento y permitiría obtener resistencias mecánicas equiparables.

La función química del humo de sílice, como la de otras puzolanas, consiste en su capacidad para formar hidratos, aumentando así la densidad de la red de hidratos formados por el cemento, lo que modifica la distribución de poros reduciendo la porosidad capilar en beneficio de una porosidad intrahidratada.

El humo de sílice puede ser mezclado con el clínker de cemento Portland en la cementera, o puede añadirse al hormigón. En ambos casos la adición de humo de sílice origina un gran aumento de las resistencias a compresión, incremento que ya es patente a los 28 días de curado, a diferencia de las cenizas volantes cuya puzolanicidad sólo se constata a partir de 90 días. Por otra parte, la puesta en obra del hormigón que contiene humo de sílice es muy fácil, la trabajabilidad y la cohesión del hormigón se ven muy mejoradas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento:	927280	Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha:	08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

En definitiva, se incrementan la resistencia a compresión, la estabilidad y la trabajabilidad, reduciendo la tendencia hacia la exudación y la segregación. Estas mejoras en la resistencia y la durabilidad del hormigón se deben principalmente al afino del tamaño de poro que origina la adición del humo de sílice.

En general, para una consistencia dada del hormigón, las adiciones minerales reducen el agua requerida en la mezcla. Sin embargo, el humo de sílice requiere un aumento del agua necesaria, y este aumento es proporcional al porcentaje en peso de sustitución del cemento.

#### 2.5.5. Origen de la puzolana en Canarias.

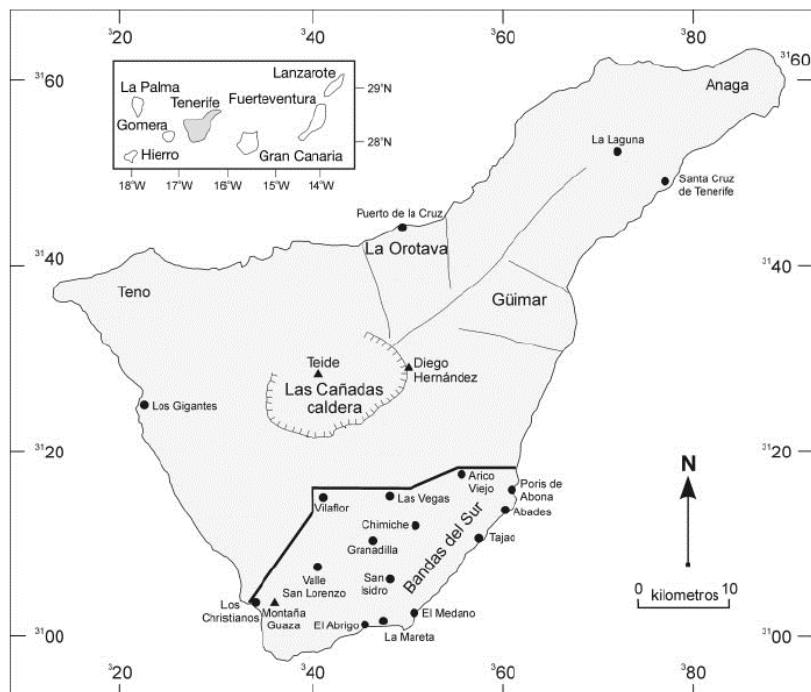
Dada la naturaleza volcánica del Archipiélago Canario es fácil encontrar compuestos puzolánicos en las distintas islas. De entre los materiales con propiedades puzolánicas destacamos la piedra pómez, que es una roca con alta porosidad, ligera (densidades entre 0,4 y 0,9 g/cm<sup>3</sup>), friable, eficaz aislante térmico. Por ser considerada una puzolana natural de bajo coste, la piedra pómez es un ingrediente importante en la elaboración del cemento Portland. Se encuentra en los depósitos del litotipo ignimbritas no soldadas IGNS (o tobas pumíticas) en las islas de Tenerife y Gran Canaria, donde acontecieron erupciones de tipo sálico que dieron lugar a este tipo de rocas piroclásticas.

Presenta las siguientes ventajas:

- Mejora la docilidad de la mezcla fresca y facilita la puesta en obra.
- Resistencia a las aguas agresivas (obras subterráneas, alcantarillado, desagües, ...).
- Menor calor de hidratación (favorable en obras masivas, presas, ...).
- Mejor impermeabilización (obras marítimas e hidráulicas).
- Resistencia a largo plazo.

En la isla de Tenerife destaca, por su importancia como fuente de puzolanas, las Bandas del Sur, ubicadas entre los municipios de Arico y Granadilla (figura 2.5) [63]. En varios trabajos recientes se han analizado amplias zonas de las Bandas del Sur tanto desde el punto de vista geológico, petrológico y químico [63,64]. Clay *et al.* aporta valiosa información acerca de la composición química de los minerales presentes en la zona, que ponen de relieve su potencial uso como adiciones puzolánicas tanto en hormigones como en morteros [64].

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 2.5.-** Ubicación de las Bandas del Sur en la isla de Tenerife (imagen adaptada de [64]).

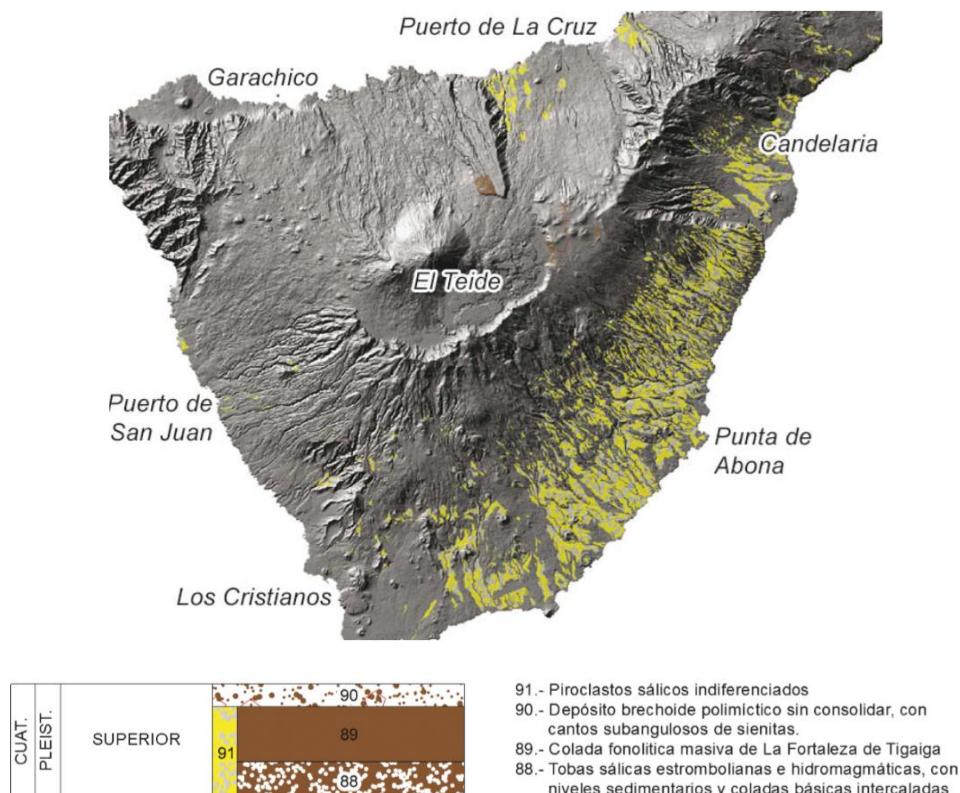
Los depósitos de puzolanas que en la actualidad se explotan en Tenerife para ser empleados en la fabricación de cementos corresponden a la unidad geológica denominada Edificio Cañadas.

El Edificio Cañadas comienza su formación a partir de los 4 Ma (Plioceno inferior) hasta hace tan solo 170 000 años, en los que sucesivas erupciones de carácter explosivo y efusivo construyeron varios edificios volcánicos de carácter central que se superpusieron entre sí. Las dimensiones horizontales de estos edificios fueron kilométricas y alcanzaron alturas cercanas a la actual cota del Teide, 3718 m, constituyendo estratovolcanes compuestos [65]. Los flancos de estos macrovolcanes se extendieron más allá de la actual línea de costa por el norte y sur de la isla, lo que da idea del tamaño tan colosal de los mismos. Cubrieron progresivamente partes de los antiguos edificios basálticos de Anaga, Teno y Roque del Conde, ocultando la relación espacial que había entre ellos y la que tuvieron con las primeras erupciones Cañadas. En la figura 2.6 se puede ver el mapa geológico de Tenerife [65].



**Figura 2.6.-** Mapa geológico de la isla de Tenerife (imagen adaptada de [65]).

Los depósitos que se encuentran aflorando en superficie corresponden a las últimas emisiones piroclásticas del Edificio Cañadas; a esta unidad se la denomina Piroclastos sálicos indiferenciados, que se pueden ver en la figura 2.7 [65]. Es la unidad más extendida de todos los Edificios Cañadas. Aflora principalmente por las laderas sur y sureste de la isla, cubriendo gran parte de las unidades Cañadas de la serie intermedia. En las laderas sur debieron recubrir todo el terreno preexistente. Sin embargo, la red de barrancos y arroyos la ha compartimentado en infinidad de afloramientos aislados que marcan el techo de la secuencia. Composicionalmente, los piroclastos no son homogéneos y engloban piroclastos de diversa naturaleza y textura. Tienen distintos grados de compactación, predominando la presencia de pómex. De manera más escasa hay también líticos básicos y rocas granudas (sienitas). No se conocen con exactitud los centros de emisión de los que proceden, pero sin duda, tienen que ser múltiples.



**Figura 2.7.-** Mapa geológico de localización de puzolana (91.- Piroclastos sálicos indiferenciados) de la isla de Tenerife (Imagen adaptada de [65]).

## 2.6. Referencias.

- [1] M.T. Solesio de la Presa, Algunas consideraciones sobre el origen de los términos hormigón y concreto, *Mater. Constr.* 34 (1984) 69-75.
- [2] R. Schaadel, Arqueología chilena. Contribuciones al estudio de la región comprendida entre Arica y La Serena. Centro de estudios antropológicos, Universidad de Chile, Santiago, 1956.
- [3] V. Castro, V Aldunate, V. Velera, El proyecto Cobija...Veinte años después, en homenaje a Bente Bittmann. XVII Congreso Nacional de Arqueología Chilena Valdivia, 2006.
- [4] M. Fernández Cánovas, Hormigón, Servicio de publicaciones de Colegio de ingenieros canales y puertos, Madrid, 2004.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento:	927280
Firmado por:	Código de verificación: 1tJxZHC8
NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

- [5] C. Simonnet, Hormigón: historia de un material: economía, técnica, arquitectura. Donostia San Sebastian, Nerea, 2009.
- [6] J. M. Torrents Terres, Vía seca o vía húmeda, *Mater. Constr.* 15 (1965) 118-119.
- [7] A. M. Neville, Properties of Concrete, 5<sup>a</sup> ed., Pearson, Nueva York, 2011.
- [8] Ministerio de la Presidencia, REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.
- [9] A. Silva, R. Neves, J. de Brito, Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 50 (2014) 73-81.
- [10] Y.G. Du, A.H.C. Chan, L.A. Clark, Finite element analysis of the effects of radial expansion of corroded reinforcement, *Comput. Struct.* 84 (2006) 917-929.
- [11] R. Neves, F.A. Branco, J. de Brito, A method for the use of accelerated carbonation tests in durability design, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 585-591.
- [12] P.K. Mehta, Durability of concrete – fifty years of progress?, en: Durability of Concrete – 2nd International Conference on Durability of Concrete, vol. 1, Montreal, 1991, pp. 1-31.
- [13] R.R. Hussain, T. Ishida, Development of numerical model for FEM computation of oxygen transport through porous media coupled with micro-cell corrosion model of steel in concrete structures, *Comput. Struct.* 88 (2010) 639-647.
- [14] K. Tuutti, Corrosion of Steel in Concrete, 1<sup>a</sup> ed., Swedish Cement and Concrete Research Institute, KTH, Estocolmo, 1982.
- [15] F. Arredondo, Estudio de los Materiales, Tomo I. Servicio de Publicaciones Revista de Obras Públicas, Madrid, 1983.
- [16] C. Blanco Peñalver, Evaluación de la penetración de agresivos en estructuras de hormigón situadas en Canarias y su influencia en la corrosión de armaduras. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2015.
- [17] P.G. Tornadillo, M.Á. Climent Llorca, E. Zornoza Gómez, Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Armado. Editorial Club Universitario, Alicante, 2008.
- [18] L.E. Hernández Gutiérrez, Caracterización Geomecánica de las Rocas Volcánicas de las Islas Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2014.
- [19] AENOR. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, UNE-EN 197-1. AENOR, Madrid, 2011.
- [20] AENOR. Métodos de ensayos de cementos. Parte 2: Análisis químicos de cementos. UNE EN 196-2. AENOR, Madrid, 2014.

---

48

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- [21] AENOR. Métodos de ensayos de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. UNE EN 196-3. AENOR, Madrid, 2017.
- [22] Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Azul de metileno. EN 933-9+A1. AENOR, Madrid, 2010 y 2013.
- [23] AENOR. Métodos de ensayos de cementos. Parte 6: Determinación de la finura cementos. UNE EN 196-6. AENOR, Madrid, 2010.
- [24] Abrasive grains and crude. Chemical analysis of silicon carbide. ISO 9286, 1997.
- [25] Determination of the specific Surface area of solids by gas adsorption- BET method ISO 9277, 2010.
- [26] Real Decreto 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08). Ministerio de la Presidencia. BOE nº148, de 19 de junio de 2008, pp. 27794- 2784.
- [27] M. Gener Rizo, J. M. Alonso Lavernia, Influencia de la composición mineralógica de puzolanas naturales en las propiedades de los cementos con adiciones, Mater. Constr. 52 (267) (2002) 73-77.
- [28] F. Massazza, U. Costa. Aspecto de la actividad puzolánica y propiedades de los cementos puzolánicos. Seminario sobre la química de los cementos, Wexham Springs, Reino Unido. Sept. 1977.
- [29] J. Calleja, Apología de los conglomerantes puzolánicos, Cemento Hormigón 386 (1966) 1-10.
- [30] R. Sersale, R. Aiello, Natural zeolites as active additions to the Portland clinker. 8º Congreso Internacional de la Química del Cemento. Volumen VI. Río de Janeiro, Brasil. 1986.
- [31] M. Gener. Calidad de las tobas para cemento puzolánico. Informe PPE-046.12, CTDMC. La Habana, Cuba, Julio 1985.
- [32] M. P. Luxan, M.I. Sánchez de Rojas, Estudio de la aptitud de un material como adición activa al cemento, Mater. Constr. 35 (200) (1985) 3-13.
- [33] A. Rabilero. Las puzolanas. Editorial Oriente. La Habana, Cuba, 1987.
- [34] F. Liu, M. Ross, S. Wang, Energy efficiency of China's cement industry, Energy 20 (7) (1995) 669–681.
- [35] T. Engin, V. Ari, Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study, Energy Conv. Manag. 46 (2005) 551–562.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

- [36] S. Khurana, R. Banerjee, U. Gaitonde, Energy balance and cogeneration for cement plant, *Appl. Therm. Eng.* 22 (2002) 485–494.
- [37] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, N. Roussel, Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 820–826.
- [38] P. Capros, N. Kouvaritakis, L. Mantzos, Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: top-down analysis of greenhouse gas emission possibilities in the E.U, Contribution to a Study for DG Environment, European commission, 2001.
- [39] L. Parrott, Cement, Concrete and Sustainability, A Report on the Progress of the UK Cement and Concrete Industry Towards Sustainability, Tech. rep., British Cement Association, 2002.
- [40] P. Teller, S. Denis, R. Renzoni, A. Germain, P. Delaisse, H. d'Inverno, Use of LCI for the decision-making of a Belgian cement producer: a common methodology for accounting CO<sub>2</sub> emissions related to the cement life cycle, 8th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, 2000.
- [41] D.N. Huntzinger, T.D. Eatmon, A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies, *J. Clean Prod.* 17 (2009) 668–675.
- [42] CO<sub>2</sub> capture in the Cement Industry, Technical Study. Report Number: 2008/3, Executive Committee of the IEA GHG Programme, July 2008.
- [43] C.A. Hendriks, E. Worrell, D. deJager, K. Block, P. Riemer, Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry, 4<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 30 Augst-2 September 1998, Interlaken, Switzerland.
- [44] U.S. Environmental Protection Agency, Standards for management for cement kiln dust, proposed rule. 64-FR 45632, Friday; August 20, 1999.
- [45] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L. Ozawa Meida, Carbon dioxide emissions from the global cement industry, *Annu. Rev. Energy Environ.* 26 (2001) 303–329.
- [46] M. Nadal, M. Schuhmacher, J.L. Domingo, Costebenefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16 (2009) 322–328.
- [47] BREF, 2010. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. European Commission. [eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/cl.html](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/cl.html) (ultimo acceso 17/06/16).

---

50

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- [48] E. Worrell, N. Martin, L. Price, Potentials for energy efficiency improvement in the U.S. cement industry, *Energy* 25 (2000) 1189–1214.
- [49] L. Szabó, I. Hidalgo, J.C. Cisar, A. Soria, CO<sub>2</sub> emission trading within the European union and annex b countries: the cement industry case, *Energy Pol.* 34 (2006) 72–87.
- [50] M. Taylor, C. Tam, D. Gielen, Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions from the global cement industry, in: I. International Energy Agency (Ed.), *Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry*, Paris, 2006.
- [51] P. Lund, Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries — indicative micro-economic analyses, *Ecol. Econ.* 63 (2007) 799–806.
- [52] <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/> (ultimo acceso 23/05/17).
- [53] [https://www.oficemen.com/noticia.asp?id\\_rep=1972](https://www.oficemen.com/noticia.asp?id_rep=1972) (ultimo acceso 23/05/17).
- [54] J. Calleja, Las Puzolanas. *Monografía*, 281. Instituto Eduardo Torroja de Construcción y Cemento (1968).
- [55] F. Massazza, Chemistry of pozzolanic addition and mixed cements, *6th International Symposium on Chemistry of Cement, Moscow* (1974).
- [56] F. Massazza, Pozzolanic Cements, *Cem. Concr. Compos.* 15 (1993) 185-214.
- [57] R. Sersale, "Structure et caractérisation des pozzolanes et des cendre volantes", *7th Inter Congress on the Chemistry of Cement, Paris*, 1, IV, IV-1/3-21 (1980).
- [58] F. Soria, Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción, *Mater. Constr.*, 190-191 (1983) 69-84.
- [59] V. M. Malhotra, Supplementary cementing materials for concrete, Ottawa, CANMET (1987).
- [60] H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd Edition, Thomas Telford, London (1997).
- [61] P.C. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK (2001).
- [62] J. Calleja, Los nuevos cementos europeos para hormigones, *Cemento Hormigón* 709 (1992) 1157-1181.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 2

---

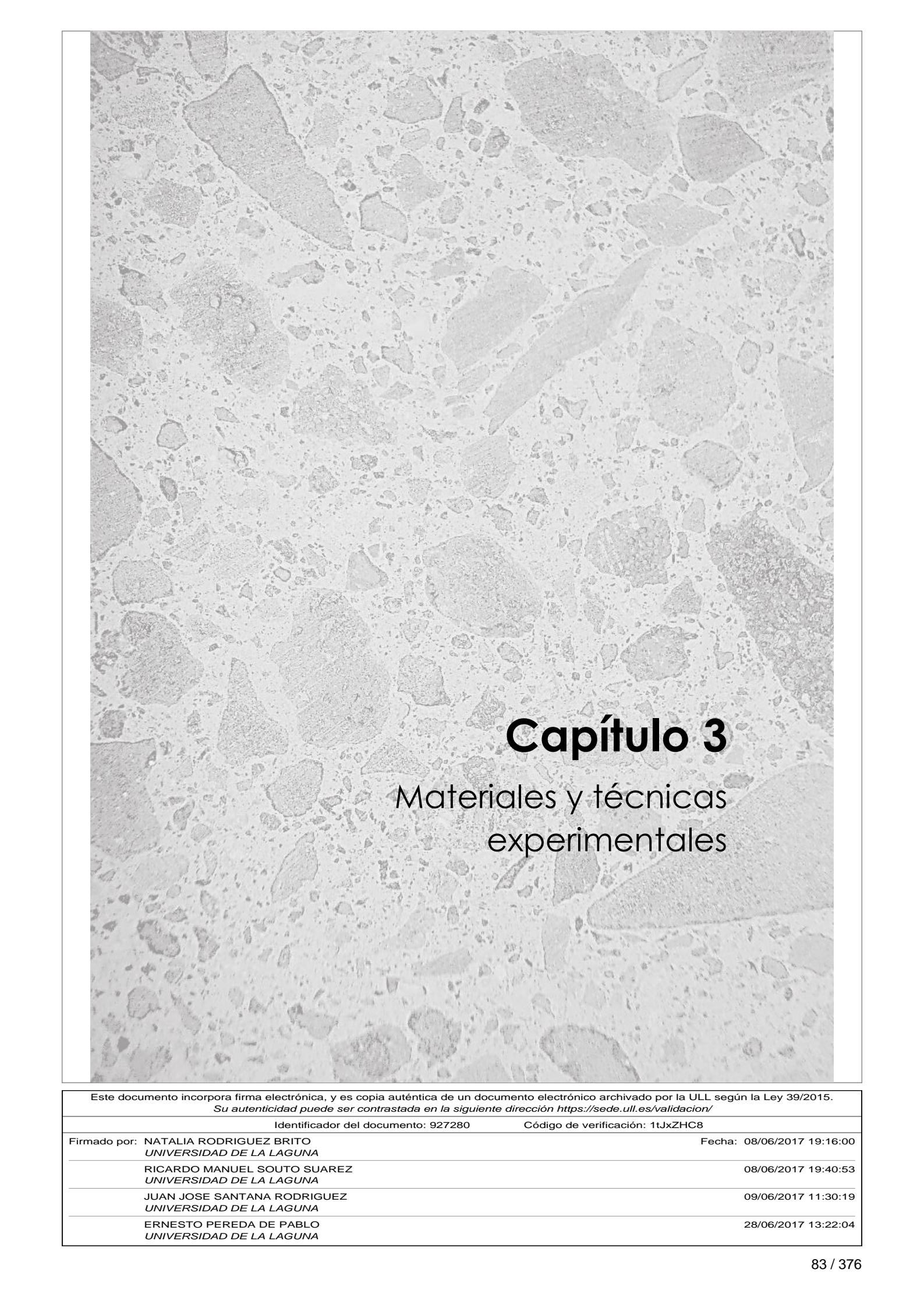
- [63] S.E. Bryan, J. Martí, M. Leesson, Petrology and Geochemistry of the Bandas del Sur formation, Las Cañadas Edificie, Tenerife (Canary Islands), *J. Petrolog.* 43 (10) (2002) 1815–1856.
- [64] P.L. Clay, S.P. Kelley, S.C. Sherlock, T.L. Barry, Partitioning of excess argon between alkali feldspars and glass in a young volcanic system, *Chem. Geol.* 289 (2011) 12–30.
- [65] J.L. Barrera Morate y R. García Moral. Mapa Geológico de Canarias. GRAFCAN. Santa Cruz de Tenerife, 2011.

---

52

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



# Capítulo 3

## Materiales y técnicas experimentales

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 3. MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.

### ÍNDICE

#### 3. MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....55

##### 3.1. Materiales empleados, fabricados y ensayados .....55

3.1.1. Áridos.....	55
3.1.2. Cementos .....	59
3.1.3. Adiciones .....	60
3.1.3.1. Filler (F) .....	61
3.1.3.2. Humo de sílice (HS) .....	62
3.1.3.3. Puzolana de toba (PZT) y puzolana de cantera (PZC) .....	63
3.1.3.4. Polvo de pulir (PV).....	65
3.1.3.5. Actividad puzolánica de las adiciones .....	65
3.1.4. Pastas de cemento .....	66
3.1.5. Morteros .....	67
3.1.5.1. Identificación de las muestras de morteros .....	68
3.1.5.2. Fabricación de las muestras de morteros.....	68
3.1.5.3. Probetas y ensayos de morteros .....	70
3.1.6. Hormigones.....	71
3.1.6.1. Identificación de las muestras de hormigones .....	73

##### 3.2. Ensayos de laboratorio realizados .....77

3.2.1. Resistencia a flexión y compresión de morteros y pasta de cementos .....	77
---	----

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	

3.2.2. Resistencia a compresión de hormigones .....	79
3.2.3. Ensayo de determinación de la consistencia fresca o asentamiento mediante el cono de Abrams .....	81
3.2.4. Ensayo de determinación de la densidad del hormigón fresco y endurecido.....	83
3.2.5. Penetración de agua bajo presión .....	83
3.2.6. Ensayo de resistividad eléctrica .....	85
3.2.6.1. Resistividad eléctrica. Método directo .....	86
3.2.6.2. Resistividad eléctrica. Método de cuatro puntas o Wenner .....	90
3.2.7. Determinación de la porosidad por intrusión de mercurio .....	92
3.2.8. Determinación de la porosidad accesible al agua.....	93
3.2.9. Determinación de la carbonatación .....	94
3.2.9.1. Ensayo de carbonatación. Método natural .....	96
3.2.9.2. Ensayo de carbonatación. Método acelerado .....	97
3.2.10. Determinación de la penetración de cloruros.....	98
3.2.10.1. Ensayo de Inmersión en piscina.....	99
3.2.10.2. Ensayo del método multirregimen .....	102
3.2.10.3. Método Integral acelerado.....	107
3.2.10.4. Ensayo Integral acelerado modificado.....	112
<b>3.3. Referencias .....</b>	<b>114</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 3 – TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

En el presente capítulo se identifican y exponen los materiales empleados, las muestras de ensayo utilizadas, así como la metodología experimental empleada en la presente tesis.

### 3.1. Materiales empleados, fabricados y ensayados.

Los materiales estudiados en la presente tesis consisten en un árido, pastas de cementos, morteros y hormigones de diferentes composiciones. Para la campaña experimental de los ensayos, tanto en morteros como en hormigones, se han fabricado probetas de diversas formas geométricas, las cuales son sometidas tanto a ensayos de laboratorio como de exposición natural. Las muestras fueron elaboradas con áridos y cementos con Marcado CE y de amplio uso en Canarias, por lo que son representativos de los morteros y hormigones empleados en la construcción actual en las islas.

En la tabla 3.1 y en el gráfico circular de la figura 3.1 se indican las características de los materiales empleados, así como el número y la distribución porcentual de los diferentes tipos de muestras que se engloban en esta tesis, siendo el 75% de las mismas de hormigón y el 25% restante muestras de mortero, pasta de cemento y un árido. Esta tabla pretende ser un resumen dado que las distintas formulaciones de morteros y hormigones se detallarán en apartados posteriores.

#### 3.1.1. Áridos.

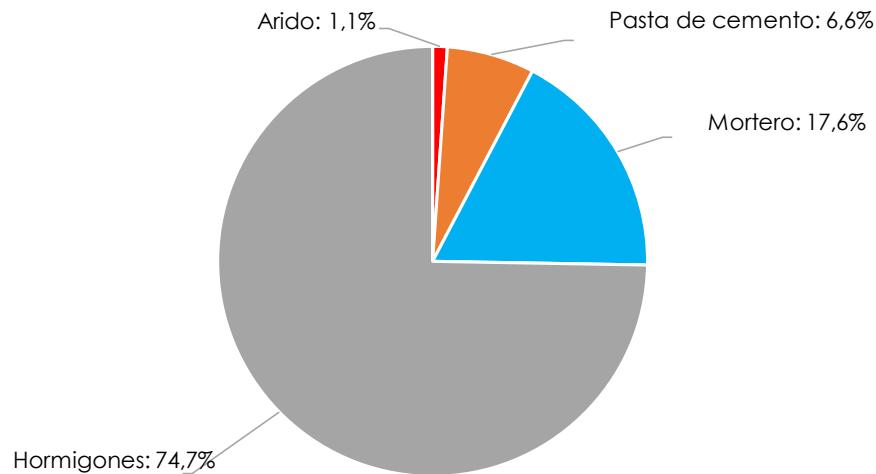
Los áridos son materiales granulares inertes de tamaño 0/20 mm. Aunque no forman parte del fraguado y endurecimiento, desempeñan un papel técnico importante del material resultante ya que, por ejemplo, del hormigón, el volumen ocupado por los áridos es de aproximadamente un 60-75% del volumen total, mientras que el resto es ocupado por la pasta de cemento (cemento, agua y aire). Los áridos no sólo cumplen una labor de material de relleno, sino que también influyen en las resistencias mecánicas, retracción, abrasión y durabilidad del hormigón y morteros.

Muchas de las propiedades de los áridos dependen de la naturaleza de la roca originaria, como la composición química, composición mineralógica, estructura petrográfica, resistencia, dureza, densidad, absorción, color, y otras que dependen del método empleado en su transformación, como son el tamaño, forma, superficie, textura superficial, número de caras de fracturas, etc. [1].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 3.1.-** Resumen del número, tipo y características de muestras.

Número	Tipo de muestra	Características
1	Árido	Basáltico
6	Pasta de cemento (Cemento y agua)	Fabricadas a partir de cuatro tipos de cements: CEMIV/B-P/32,5N BL I 52,5R CEMII/A-P/52,5R CEMII/A-P/42,5R
16	Morteros (Cemento, agua y arena)	Dos tipos de cementos: CEMII/A-P/42,5R y CEMIV/B-P/32,5N Uso de dos tipos de arena: ensacada y normalizada
		Uso de tres adiciones: filler, humo sílice y puzolana de toba
52	Hormigones de obra	Resistencia característica de HM20, HA25, HA30, HA35, HA50 Cementos que varían desde CEMII/A-P/42,5R II/A-P/42,5R MR CEMII/A-P/52,5R CEMIV/B-P/32,5N
69	17 hormigones dosificados en laboratorio	Resistencia característica de HA25, HA30, HA35 Cemento II/A-P/42,5R MR Uso de cinco adiciones: filler, humo sílice, puzolana de toba, polvo de pulir, puzolana de cantera.
91	Número total de muestras	

**Figura 3.1.-** Diagrama circular porcentual de los grupos de muestras estudiados.

Canarias es un archipiélago de origen volcánico y prácticamente la totalidad de las rocas que se encuentran en él son de esa naturaleza (salvo honrosas excepciones), y por tanto también lo son los áridos que se extraen de las canteras ubicadas en las islas.

Las rocas volcánicas de Canarias pertenecen a la denominada serie ígnea alcalina, que en este caso está asociada a un volcanismo de intraplaca, es decir a manifestaciones volcánicas que no están relacionadas con el contacto entre placas litosféricas (subducción, dorsales oceánicas, fallas transformantes, etc.), sino que se produce en el interior de una placa litosférica, en este caso, la Placa Africana. El área volcánica de Canarias está asentada en una zona de transición oceánico-continental, en el interior de la litosfera africana, sobre la corteza oceánica y muy próxima al límite entre la corteza oceánica atlántica y la corteza continental africana.

La serie ígnea alcalina está formada por una secuencia de rocas cuya composición evoluciona desde términos indiferenciados (más pobres en sílice), representados por basaltos, términos intermedios, representados por traquibasaltos y finalmente, términos más diferenciados o evolucionados (más ricos en sílice), representados por traquitas y fonolitas. Todos estos tipos de rocas volcánicas se encuentran en las Islas Canarias y están disponibles para ser transformadas en áridos para el sector de la construcción.

En la isla de Tenerife, los áridos (arena y grava) empleados tanto en morteros como en hormigones, proceden fundamentalmente del machaqueo de rocas de naturaleza basáltica, que en general se clasifican como litotipos BAFM (basalto afanítico masivo) [2]. La tabla 3.2 reúne algunas de las características de esta roca.

Los áridos empleados tanto en los morteros como en los hormigones fabricados en laboratorio, son gravas y arenas que provienen de la cantera de la empresa SATOCAN, una cantera legal situada en el término municipal de Arico, con marcado CE de áridos, que cumplen todas las exigencias de la normativa actual. En la tabla 3.3. se plasma un resumen de sus características más importantes, ensayos realizados y aportados por el Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción.

El árido basáltico, codificado (A) fue seleccionado de entre el material de cantera típico canario para la fabricación de hormigones. Se trata de partículas de grava de tamaño aproximado de 20 mm, seleccionadas de entre el material de acopio de las dosificaciones.

Como se puede ver en la tabla 3.3 de resultados característicos de nuestros áridos, la absorción es una característica a estudiar con respecto a los áridos usados en el resto del territorio nacional de origen calizo. Para efectos de comparación, indicar que los áridos calizos catalogados en la Comunidad de Valencia poseen un coeficiente de absorción de un rango entre un 0,6 y 2,7%. [3]

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		

**Tabla 3.2.-** Características petrológica y geomecánica [2] y análisis por Fluorescencia de Rayos X del litotipo BAFM.

<p><u>Caracterización petrológica</u></p> <p>Se caracterizan por una masa homogénea criptocristalina, carente de vacuolas, (textura formada por diminutos cristales cuya naturaleza crísalina no es observable al microscopio) a microcristalina (pequeños cristales sólo visibles al microscopio) de microlitos de olivino, augita, plagioclasa y minerales metálicos opacos.</p>	 BAFM: imagen de lámina delgada con LPNA												
Determinación de peso específico de la roca (kg/m <sup>3</sup> )	Aparente 2840 Seco 2730 Saturado 2770 Real partículas sólida 2910												
Porosidad (%)	Total 5,54 Abierta 3,59												
Absorción (%)	1,23												
Resistencia a compresión (MPa)	104,4												
<i>Análisis por Fluorescencia de Rayos X de la BAFM</i>													
SiO <sub>2</sub> 44,11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15,02	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 14,9	CaO 9,47	MgO 6,31	Na <sub>2</sub> O 4,01	K <sub>2</sub> O 1,26	MnO 0,204	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0,80	TiO <sub>2</sub> 4,53	LOI 0,71	CO <sub>2</sub> --	SO <sub>4</sub> <0,05	Cl 0,19

**Tabla 3.3.-** Ensayos del Marcado CE de áridos.

	Arena 0/4 mm	Grava 10/20 mm
Equivalente de arena UNE EN 933-8	67	---
Granulometría y contenido en finos UNE EN 933-1 (%)	7-10	---
Índice de lajas (gravas) UNE EN 933-3	---	7,1
Densidad relativa del árido grueso y fino (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta_a$ $\delta_{rd}$ $\delta_{rds}$	2,85 2,6 2,69
UNE EN 1097-6		2,8 2,53 2,64
Absorción del árido grueso y fino (%) UNE EN 1097-6	3,97	3,65
Contenido de cloruro UNE EN 1744-1	0,0017	0,00035
Contenido de sulfatos solubles en agua y ácido UNE EN 1744-1	no	no
Contenido de azufre total UNE EN 1744-1	no	no
Contaminantes orgánicos ligeros UNE EN 1744-1	0,066	---
Contenido de humus (arena) UNE EN 1744-1	más clara	---

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Dada la naturaleza volcánica de nuestros áridos, se prepararon muestras de morteros empleando arena ensacada basáltica 0/4 tamizada a 0/2 (AS) y una arena normalizada con sello AENOR (AN) (figura 3.2). De esta forma se podrá conocer el grado en el que afecta la naturaleza de nuestro tipo de árido canario en la formulación de morteros.



**Figura 3.2.-** Muestras de arena ensacada (AS) y arena normalizada (AN).

### 3.1.2. Cementos.

Los cementos empleados en la fabricación de las probetas de pasta de cemento, morteros y hormigones son de uso extendido en la isla de Tenerife, eligiéndose por ser los que usualmente se fabrican, suministran y consumen no sólo en esta isla sino en el resto del Archipiélago. Todos cumplen con la garantía del marcado CE de cementos y con el reglamento de recepción de cementos (RCC) y las marcas o sellos de calidad que acompañan a estos materiales en los procesos de certificación.

Los cementos usados para cada tipo de muestra son los siguientes:

- Cementos usados para la fabricación de las pastas de cementos (4 tipos distintos): CEMIV/B-P/32,5N; BL I 52,5R; CEMII/A-P/52,5R y CEMII/A-P/42,5R.
- Cementos usados para la fabricación de morteros, dosificados en este proyecto (dos tipos): CEMIV/B-P/32,5 y CEMII/A-P/42,5R.
- Cementos usados para la fabricación de hormigones de obra, elaborados en la planta hormigonera donde son fabricados (4 tipos): CEMIV/B-P/32,5N; CEMII/A-P/42,5R; II/A-P/42,5R MR y CEMII/A-P/52,5R.
- El cemento usado para la fabricación de hormigones en el laboratorio, dosificados para este proyecto: II/A-P/42,5R MR.

En la tabla 3.4 se muestran la resistencia característica y otras propiedades a destacar de los dos cementos de la Marca Cemento Teide (Votorantim), que han

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

sido utilizados en las muestras de los diecisésis morteros y los diecisiete hormigones de laboratorio, fabricados en las instalaciones del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias.

**Tabla 3.4.-** Resistencia característica y otras propiedades de los cementos empleados en las amasadas de morteros y hormigones fabricados en laboratorios\*.

	CEMIV/B-P/32,5N	II/A-P/42,5R MR
Pérdida por calcinación (P.F.)	5,7	3,4
Residuo insoluble (R.I.)	20,1	10,1
Contenido de cloruros (Cl %)	0,02	0,01
Contenido de sulfatos (SO <sub>3</sub> %)	2,91	3,38
Inicio de fraguado (I.F. min)	190	150
Fin de fraguado (F.F. min)	250	215
Expansión (Le Chatelier EXP mm)	1,0	0,0
Rotura a compresión a 7 días (N/mm <sup>2</sup> )	25,1	37,0
Rotura a compresión a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	37,2	51,6
Contenido de puzolana (%)	41	19
Contenido de clínker (%)	54	76
Contenido de yeso (%)	5	5

\*Datos aportados por el fabricante.

### 3.1.3. Adiciones.

Las adiciones son materiales que tienen por objeto reducir el porcentaje de cemento portland a emplear, por lo que deben cumplir una serie de requisitos tal como los descritos en el capítulo anterior. En la presente tesis se han empleado cinco materiales distintos como adiciones. En una primera fase, en las muestras de mortero se emplearon tres materiales como adiciones: filler (F), puzolana de toba (PZT) y humo de sílice (HS). En una posterior campaña de ensayos de los hormigones dosificados en laboratorio se amplió el número de materiales usados como adiciones a cinco, las tres de la primera fase: filler (F), puzolana de toba (PZT) y humo de sílice (HS) más dos nuevas: polvo de pulir (PV) y puzolana de cantera (PZC). En la figura 3.3 se puede observar la apariencia visual de los cinco materiales usados como adición.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.3.-** Muestras de los cinco materiales adicionados a los morteros y hormigones.

### 3.1.3.1. Filler (F).

El filler es un residuo de cantera de machaqueo de áridos de una densidad o peso específico de 2700 kg/m<sup>3</sup>. Se trata del polvillo de roca resultante de la fricción de las diferentes partículas al ser machacadas a los tamaños requeridos en la cantera, generalmente gravas, gravillas y arenas, de granulometrías entre 20 y 0,063 mm, quedando un residuo de tamaño de partícula menor de 0,063 mm el cual la cantera o el fabricante de hormigón y asfalto, debe eliminar, generándole un costo. El filler utilizado como material de adición proviene del tamizado de los áridos de la cantera de la empresa SATOCAN. En la tabla 3.5 se recogen algunas propiedades del mismo.

**Tabla 3.5.** – Análisis granulométrico del filler, tamizado por vía húmeda.

Tamices UNE	% pasa
0,118	71,63
0,086	65,09
0,063	55,28
0,041	43,83
0,025	30,75
0,018	25,84
0,013	20,93
0,009	16,03
0,007	12,76
0,003	7,85
0,002	7,85

### 3.1.3.2. Humo de sílice (HS).

El humo de sílice condensado, que también se conoce por otros nombres como sílice volatilizada, microsílice o simplemente humo de sílice, es un subproducto que se genera durante la obtención de silicio y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. La reducción del cuarzo para obtener el silicio se realiza a alta temperatura (aproximadamente a 2000 °C), debido a lo cual se produce SiO gas como paso intermedio en la reducción del SiO<sub>2</sub>. Una parte del SiO es transportado a zonas de baja temperatura donde se oxida al estar en contacto con el aire y condensa en forma de partículas esféricas de sílice no cristalina. Este material, que es extremadamente fino, se elimina de la corriente gaseosa que lo arrastra mediante filtros de saco.

El polvo está formado por esferas de gran finura compuestas por un gran porcentaje (82 al 96%) de sílice amorfita (SiO<sub>2</sub>). La densidad relativa del humo de sílice es de 2200 kg/m<sup>3</sup> [4]. El humo de sílice utilizado en las dosificaciones de las muestras es de la marca Techmo, Fume SD-92. El humo de sílice empleado presenta las siguientes características (tablas 3.6 y 3.7).

**Tabla 3.6.-** Características físico químicas y granulométricas del humo de sílice empleado, aportadas por el fabricante.

<b>Análisis químico</b>		<b>Propiedades físicas</b>	
Parámetros químicos	%	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	23,9
SiO <sub>2</sub>	88,2	Finura (% retenido en 45 µm)	0,5
Pérdidas por calcinación	3,1	Índice de actividad 28 días	115,2
C	2,8		
Cl <sup>-</sup>	0,067		
SO <sub>3</sub>	0,31		
CaO	0,40		
K <sub>2</sub> O	0,52		
Na <sub>2</sub> O	0,23		
Álcalis como Na <sub>2</sub> O	0,62		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,54		
MgO	0,69		
Si Elemental	0,13		
Humedad	0,31		
<b>Granulometría</b>			
		Fracción (µm)	% nº de partículas
		< 0,5	30,8
		0,5 - 1	60,5
		1 - 2	6,6
		2 - 5	1,8
		5 - 10	0,3
		>10	0,0

**Tabla 3.7.-** Análisis granulométrico del humo de sílice, tamizado por vía húmeda.

Tamices UNE	% pasa	Tamices UNE	% pasa
0,158	16,02	0,015	6,21
0,112	14,38	0,011	6,21
0,080	12,75	0,008	4,58
0,051	11,11	0,003	2,94
0,027	7,85	0,002	7,87
0,021	6,21		

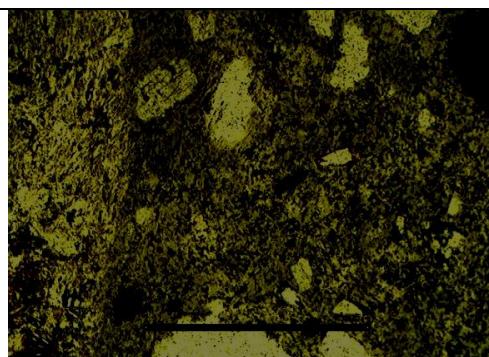
### 3.1.3.3. Puzolana de toba (PZT) y puzolana de cantera (PZC).

En la presente tesis se ha trabajado con dos tipos de puzolanas: de Toba y de cantera. Una primera adición de puzolana procede del machaqueo y molienda de la roca clasificada como el litotipo de Ingimbrita no soldada (IGNS) [2]. La tabla 3.8 aporta las características petrológicas y geomecánicas de la roca.

Más concretamente, se ha extraído de un bloque comercial de toba o tosca, de la cantera “Cantos Blancos del Sur” en el municipio de Arico (figura 3.4), por lo que de aquí en adelante denominaremos puzolana de toba, e identificaremos con las siglas PZT. Este bloque es muy utilizado en mampostería y sillería en Canarias, sobretodo en restauración y detalles arquitectónicos.

**Tabla 3.8.-** Características petrológicas, geomecánicas y análisis por fluorescencia de Rayos X de la roca IGNS [2].

Caracterización petrológica IGNS  
Están constituidas por una mezcla caótica de fragmentos de pómez, ceniza, fragmentos de roca y cristales. Tienen composición traquítica o fonolítica y bajo el microscopio petrográfico se pueden observar cristales de anortoclasa o sanidina, fragmentos vítreos de morfología irregular, fragmentos de egirina, hornblenda y minerales opacos, todos ellos en una matriz microcristalina o vítreos.



IGNS imagen de lámina delgada con LPNA

Determinación de peso específico de la roca (kg/m <sup>3</sup> )	Aparente Seco Saturado Real partículas sólidas	2200 1640 1900 2210											
Porosidad (%)	Total Abierta	44,4 22,6											
Absorción (%)		5,98											
Resistencia a compresión (MPa)		16,5											
Análisis por Fluorescencia de Rayos X de la IGNS													
SiO <sub>2</sub> 50,19	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 17,35	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3,08	CaO 1,45	MgO 1,31	Na <sub>2</sub> O 6,42	K <sub>2</sub> O 4,94	MnO 0,15	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0,10	TiO <sub>2</sub> 0,64	LOI 14,38	CO <sub>2</sub> 0,68	SO <sub>4</sub> 0,21	Cl 0,53

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.4.-** Imagen de corte de puzolana de toba (izquierda) y uso de aplacado decorativo de la toba (derecha).

La segunda adición de puzolana procedente de desmonte de la cantera de áridos SATOCAN en el municipio de Arico, denominada PZC. Se trata de un polvillo de una densidad real o peso específico de 2550 kg/m<sup>3</sup>, que se produce como un material de desecho durante la explotación, en busca de las capas de extracción de áridos óptima (figura 3.5).



**Figura 3.5.-** Puzolana de cantera (izquierda) y acopios del desmonte en la cantera durante la extracción de la capa de basalto para la obtención de arena y grava (derecha).

En la tabla 3.9 se muestran los análisis granulométricos de ambas adiciones.

**Tabla 3.9.-** Análisis granulométrico de la puzolana de toba y de cantera, tamizadas por vía húmeda.

<b>Puzolana de Toba (PZT)</b>		<b>Puzolana de Cantera (PZC)</b>	
<b>Tamices UNE</b>	<b>% pasa</b>	<b>Tamices UNE</b>	<b>% pasa</b>
0,158	16,02	0,158	16,02
0,112	14,38	0,112	14,38
0,080	12,75	0,080	12,75
0,051	11,11	0,051	11,11
0,027	7,85	0,027	7,85
0,021	6,21	0,021	6,21
0,015	6,21	0,015	6,21
0,011	6,21	0,011	6,21
0,008	4,58	0,008	4,58
0,003	2,94	0,003	2,94
0,002	7,87	0,002	7,87

### 3.1.3.4. Polvo de pulir (PV).

El polvo de pulir es un residuo del hormigón, originado en el laboratorio del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción, que se produce al pulir la cara superior de las probetas de hormigón que van a ser ensayadas a compresión simple. Este polvo tiene una densidad real de 2680 kg/m<sup>3</sup> también se podría obtener, por la trituración de elementos de hormigón provenientes de procesos de demolición. En la tabla 3.10 se muestra un análisis granulométrico realizado por vía húmeda.

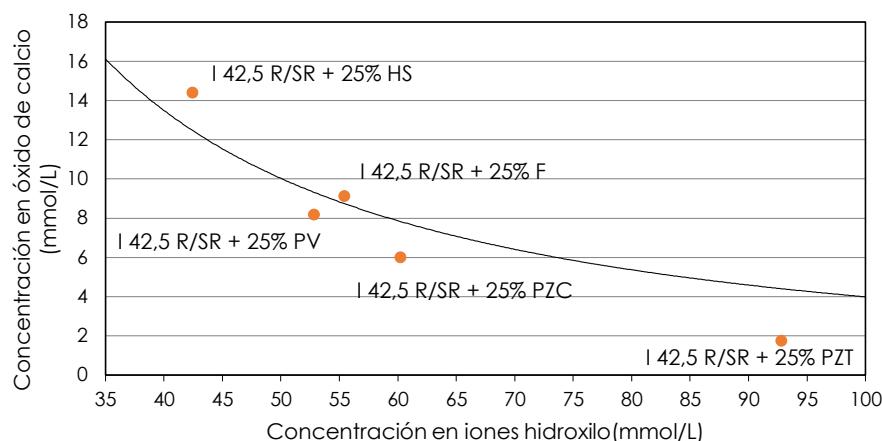
**Tabla 3.10.-** Análisis granulométrico del polvo de pulir, tamizado por vía húmeda.

<b>Tamices UNE</b>	<b>% pasa</b>
0,126	68,78
0,09	65,34
0,066	55,02
0,048	41,27
0,026	30,95
0,018	24,07
0,013	22,35
0,009	20,63
0,007	18,91
0,003	18,91
0,002	18,91

### 3.1.3.5. Actividad puzolánica de las adiciones.

Todas las adiciones que han sido usadas en las amasadas de los hormigones, fueron valoradas en busca de la determinación del índice de la actividad puzolánica

con la cal (IAP) según la ASTM 311[5] y fijado en la UNE 80303-2 [6] en el apartado 7.2.b) y según método de ensayo UNE EN 196-5 [7] a los 7 días. El ensayo consiste en realizar una mezcla de un cemento de referencia (I 42,5 R/SR) y la adición objeto de estudio, en proporción igual a 75/25 en masa. Esta mezcla (20 g) se hidrata con 100mL de agua. El resultado se determina por comparación de la cantidad de hidróxido de calcio que contiene, pasado un periodo fijo de 7 días a una temperatura de 40 °C. Se considera el ensayo positivo cuando la concentración de hidróxido de calcio en disolución es inferior a la concentración de saturación. Los resultados de la mezcla de cemento/adición, expresados en mmol/L, cumplen el ensayo de puzolanicidad cuando el punto expresado en la gráfica (figura 3.6), está situado por debajo de la curva de referencia.



**Figura 3.6.-** Gráfica de concentración de óxido de calcio frente a la concentración de iones hidroxilos.

### 3.1.4. Pastas de cemento.

La pasta de cemento o simplemente pasta, es la mezcla de cemento y agua sin ningún tipo de árido. En ocasiones a la pasta de cemento también se la denomina matriz y en función de la mayor o menor proporción de agua la pasta de cemento tendrá una consistencia más o menos fluida, denominándose lechada a la consistencia más fluida. Para garantizar la homogeneidad de las muestras ensayadas, las probetas han sido fabricadas mediante el empleo de la mezcladora eléctrica y los tiempos de amasado usados en los cementos. Las normas UNE-EN 197-1 [8] y UNE-EN 196-1 [9], establecen en su contenido los métodos de ensayo y las especificaciones de uso.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Se fabricaron en laboratorio seis muestras de pasta de cemento (C), a partir de cuatro tipos de cementos (CEMIV/B-P/32,5N; BL I 52,5R; CEMII/A-P/52,5R y CEMII/A-P/42,5R), empleando los equipos de amasado, compactado y curado, exigidos por la norma UNE EN 196-1 [9], con las dosificaciones plasmadas en la tabla 3.11. Las muestras se han codificado asignándole a cada una un código consistente en una C, que indica que es una muestra de pasta de cemento, seguido de un número, que indica el número de probeta.

**Tabla 3.11.-** Identificación, clasificación y características de las muestras de pasta de cemento.

Código de muestra	Fecha muestra	Tipo de hormigón	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Resistencia a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )
C1	21/11/2011	Pasta de cemento	CEMIV/B-P/32,5R	0,34	74,1
C2	21/11/2011	Pasta de cemento	BL I 52,5R	0,32	53,7
C3	21/11/2011	Pasta de cemento	BL I 52,5R	0,40	65,0
C4	21/11/2011	Pasta de cemento	CEMII/A-P/52,5R	0,32	74,1
C5	21/11/2011	Pasta de cemento	CEMII/A-P/42,5R	0,41	53,7
C6	21/11/2011	Pasta de cemento	CEMIV/B-P/32,5N	0,26	65,0

### 3.1.5. Morteros.

Los morteros de este estudio se fabricaron con la idea de conocer mediante ensayos previos a la fabricación de los hormigones, la influencia de alguno de sus componentes, como son: el tipo de árido, el tipo de cemento, y una variedad de adiciones que pueden sustituir al cemento en un 20%.

Respecto al tipo de cemento, se plantea conocer el grado en el que puede afectar los dos tipos de cemento más utilizados en Canarias, cemento Portland (CEMII/A-P/42,5R) y cemento puzolánico (CEM IV/B-P/32,5N)

En cuanto a los distintos tipos de adiciones, se han utilizado sustituyendo un 20% a los cementos, con el objeto de detectar una posible mejora respecto a un mortero patrón sin adiciones. Las adiciones empleadas son filler (F), puzolana de toba (PZT) y humo de sílice (HS).

Para los ensayos se han fabricado las probetas de morteros según norma UNE EN 1015-11[10], de las dimensiones y con las características apropiadas para cada tipo de ensayo que se tenga previsto realizar.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 3.1.5.1. Identificación de las muestras de morteros.

Las diecisésis muestras de morteros fabricadas se muestran en la tabla 3.12. y se codificaron mediante la asignación de números y letras. La identificación sigue la siguiente secuencia de agrupaciones:

M 1/2 AR/AS P/PZT/F/HS

donde:

- M: La identificación de que la muestra es un mortero.
- 1/2: Indican el tipo de cemento usado en la amasada: el número 1 corresponde a las amasadas con cemento CEMII/A-P/42,5R y el número 2 corresponde al CEM IV/B-P/32,5N.
- AR/AS: indican si se trata de arena normalizada (AR) o ensacada (AS).
- P: indica que es un mortero patrón sin adiciones.
- PZT/F/HS: indican el tipo de aditivo: PZT, cuando la adición es la puzolana, que proviene del molido de tobas, F cuando la adición es filler (polvo proveniente de los áridos usados en la fabricación del asfalto) y HS cuando la adición es humo de sílice.

### 3.1.5.2. Fabricación de las muestras de morteros.

Todos las amasadas de mortero se han fabricado siguiendo las condiciones descritas en la UNE EN 1015-11 [10], en la que se establece una dosificación genérica descrita para la norma de cementos UNE EN 196-1 [9], de proporción en masa (1/3) de una parte de cemento, tres partes de arena y media parte de agua (relación a/c = 0,50). La dosificación utilizada para cada amasada, se muestra en la tabla 3.13.

Para la fabricación del mortero se utilizó una amasadora de 5 litros de capacidad con dos velocidades de trabajo, una rápida y otra lenta, siguiendo la siguiente secuencia de amasado:

1. Se vierte el agua dentro del recipiente de la amasadora.
2. Se añade el cemento.
3. Se inicia el amasado a velocidad lenta y a los 30 segundos se introduce de forma regular la arena durante los 30 segundos siguientes, momento en el cual se pasa a velocidad rápida durante otros 30 segundos.
4. Se detiene el amasado y mediante una espátula de goma se retira el mortero adherido a la pala de la amasadora y se devuelve a la mezcla.
5. Continúa el amasado durante 1 minuto más a velocidad rápida.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 3.12.-** Identificación, clasificación y características de las muestras de mortero ensayadas.

Codificación	Fecha Fabricación	Cemento	Arena	Adiciones
M1ANP	27-01-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena normalizada	Sin adición
M2ANP	27-01-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena normalizada	Sin adición
M1ANPZT	29-01-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena normalizada	Puzolana
M2ANPZT	29-01-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena normalizada	Puzolana
M1ANF	13-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena normalizada	Filler
M2ANF	13-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena normalizada	Filler
M1ANHS	27-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena normalizada	Humo Sílice
M2ANHS	27-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena normalizada	Humo Sílice
M1ASP	19-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena ensacada	Sin adición
M2ASP	19-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena ensacada	Sin adición
M1ASPZT	19-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena ensacada	Puzolana
M2ASPZT	19-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena ensacada	Puzolana
M1ASF	24-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena ensacada	Filler
M2ASF	24-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena ensacada	Filler
M1ASHS	26-02-2014	CEMII/A-P/42,5R	Arena ensacada	Humo Sílice
M2ASHS	26-02-2014	CEM IV/A-P/ 32,5N	Arena ensacada	Humo Sílice

**Tabla 3.13.-** Materiales y dosificación para la fabricación de morteros.

Material de dosificación	Cantidad (g)
Cemento	450 ± 2
Arena normalizada/ensacada	1350 ± 5
Agua	225 ± 1

Inmediatamente después de la preparación del mortero se fabricaron las probetas. Debido a los distintos tamaños de probeta se realizan dos procedimientos de llenado y compactación:

1.- Probetas de mortero de dimensiones 40x40x160 mm que se compactan mediante dos tongadas con 25 golpes de pisón cada una, según indica la norma UNE -EN 1015-11 [10]. Para las probetas de mortero cúbicas de 10 cm de arista y las probetas cilíndricas de 10x20 cm, se ha seguido el procedimiento de compactado y llenado propio de probetas de hormigón, según norma UNE-EN 12390-1:2001 [11] y UNE-EN 12390-2:2009 [12]

2.- Finalizando el proceso de compactado y llenado, se enrasaron las probetas y se taparon con un cristal para que no sufrieran evaporación del agua

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

superficial, siendo sacadas de sus moldes a las 24 horas. Todas las probetas han sido curadas en cámara húmeda hasta cumplir los 28 días, tal y como recomienda la norma española de conservación de probetas 12390-2:2009 [12].

### 3.1.5.3. Probetas y ensayos de morteros.

Se han fabricado probetas de mortero de tres tipos: probetas prismáticas de 4x4x16 cm, cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, y cúbicas de 10 cm (figura 3.7).



**Figura 3.7.-** Probetas de mortero en sus respectivos moldes.

En la tabla 3.14 se presenta el plan de ensayos, tipo y número de probeta y temporalidad de los mismos.

**Tabla 3.14.-** Plan de ensayos, tipo y número de probeta y temporalidad de los mismos.

Ensayo	Probeta	Nº	Edad de ensayo desde su fabricación (días)
Resistencia a flexión y compresión	Prismática 4x4x16 cm	3	Tras el curado de 28 días
Carbonatación natural, ambiente B	Prismática 4x4x16 cm	3	Un curado de 28 días y exposición ambiental: 6 meses, 1 año y 2 años
Porosidad accesible	Prismática 4x4x16 cm	2	Tras curado 28 días, son cortadas y ensayadas en un plazo aproximado de 1 mes
Penetración de Cl <sup>-</sup> por el método de Piscina	Cónica 10 cm	1	Un curado de 28 días, Exposición de ensayo de 90 días
Resistividad	Cilíndrica 10x20 cm	2	A edades aproximadas de 3, 7, 28, 42, 60, 90, 120, 160, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 365, 545, 730, 912, 1095 días

### 3.1.6. Hormigones.

La población de muestras de hormigones es muy variada, ya que se ha intentado que sea representativa de los hormigones fabricados en Canarias, con áridos basálticos, con amplio rango de tipos de hormigones, tipo y cantidad de cemento, relaciones agua/cemento, etc...

Las muestras de hormigones provienen, por un lado, de amasadas de obras reales dosificados en planta, mientras que otros hormigones han sido dosificados y elaborados en laboratorio. Asimismo, indicar que las probetas de ensayo para una misma muestra varían de geometría en función del tipo y necesidades del ensayo a desarrollar. De forma general las probetas de cada muestra son fabricadas y conservadas de acuerdo a las normas UNE-EN 12390-1:2001 [11] y UNE-EN 12390-2:2009 [12] y no se pueden mover durante las primeras 24 horas hasta su fraguado, y para evitar la evaporación superficial del agua durante estas horas iniciales, se cubren con bolsas de plástico (figura 3.8).



**Figura 3.8.-** Probetas de hormigón contenidas en su molde (izquierda) y cubiertas con plásticos (derecha).

Dentro de una misma muestra nos podemos encontrar con probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, que a partir de ahora se denominarán probetas de 15x30, cúbicas de 10 cm y prismáticas de 15 cm de lado y 60 cm de largo, tal y como se muestra en la figura 3.9.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.9.-** Probetas de hormigón cilíndricas (izquierda), cúbicas y prismáticas (derecha).

Finalmente, durante los respectivos tiempos de curado (generalmente 28 días) las probetas se conservan en cámara húmeda. Pasado el periodo de curado las probetas son sometidas a distintos ensayos. En la tabla 3.15. se presenta los distintos ensayos realizados, tipo de probeta y temporalidad de los mismos.

**Tabla 3.15.-** Ensayos realizados, tipo de probeta y temporalidad aproximada de los mismos.

Ensayo	Probeta	Edad de ensayo desde su fabricación (días)
Resistencia a flexión y compresión	Cilíndrica 15x30	Tras los 28 días de curado
Penetración de agua*	Cilíndrica 15x30	Tras los 28 días de curado y secado en estufa
Carbonatación natural, ambiente B	Prismática 15x15x60	Un curado de 28 días Exposición de ensayo de 90 días y 6 meses o 1 año
Carbonatación acelerada	Prismática 15x15x60	Un curado de 28 días Preaccondicionado de 28 días Exposición de ensayo de 14 días
Porosidad accesible	Cúbica 10	Un curado de 28 días Tiempo de ensayo aproximado de 21 días
Penetración de Cl <sup>-</sup> , por el método de Piscina*	Cilíndrica 15x30	Un curado de 28 días Exposición de ensayo de 90 días, más aproximadamente una semana entre el tiempo de molido y ensayo
Resistividad directa y de Wenner	Cilíndrica 15x30	3,7, 28, 42,60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 365,...llegando en algunas muestras a casos de ensayos 2, 3 o 4 años
Método integral	Cúbica 10	Un curado de 28 días Exposición de ensayo de con un plazo variable entre 2 y 3 meses
Método multirregimen*	Rodaja de 2,5	Un curado de 28 días Exposición de ensayo de con un plazo variable entre 21 días a 2 meses

Comentar que para los tres ensayos marcados con asterisco (\*), éstos se han realizado sobre distintas partes de la misma probeta cilíndrica de 15x30 cm. Para ello se ha procedido a cortar la probeta en un despiece tal que el primer tercio se ha utilizado para la penetración de agua, sobre el tercio central se han tomado las muestras de las rodajas para el método multirregimen, y sobre el último tercio se ha realizado el ensayo de penetración de cloruros por el método de piscina (figura 3.10).



**Figura 3.10.-** Probeta cilíndrica cortada (izquierda) y despiece (derecha).

### 3.1.6.1. Identificación de las muestras de hormigones.

Las muestras se han identificado y diferenciado según su naturaleza y su procedencia, ya sean tomas de obras o de laboratorio. Se analizaron un total de 69 muestras. Para su identificación se han codificado mediante la asignación de letras y números, separados por un guion y en atención a su definición según la EHE-08 [13] y sus principales características, las cuales están detalladas en el albarán de suministro a obra, como son el contenido y tipo de cemento y la relación agua/cemento y o bien son conocidas ya que se traten de muestras dosificadas y fabricadas en laboratorio.

En la tabla 3.16 se indica la codificación e identificación las muestras, que se ha dividido en dos grupos H y D dependiendo de su fabricación, donde

HX

- H: indica que se trata de muestras de hormigones fabricados en planta hormigonera y tomados en obra, de distintas resistencias y características, que abarcan un amplio abanico (desde hormigones en masa y armados) y de variadas resistencias características (desde 20 a 50 N/mm<sup>2</sup>) y a continuación un número (X) que representa la cantidad de muestras hasta un total cincuenta y uno.

DX donde X puede ser P/F/PV/HS/PZT/PZC

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- D: indica que las muestras son de hormigones dosificados y elaborados en laboratorio; la X indica el número de la amasada hasta un total de 4 tipos de dosificaciones de hormigón, identificando así un total de diecisiete muestras, seguido de unas letras o siglas, que representan las modificaciones que apartan, según lleva o no una adición:
  - La letra P, para codificar las amasadas patrón, sin adición.
  - La letra F, para amasadas con la adición de filler de los áridos de asfalto.
  - Las letras PV, para amasadas con la adición de polvo proveniente del pulido de probetas.
  - Las letras HS, para amasadas con la adición de humo de sílice.
  - Las letras PZT, para amasadas con la adición de puzolana extraída de un bloque de toba.
  - Las letras PZC, para las amasadas con la adición de puzolana de cantera.

Dicha tabla refleja la gran diversidad de muestras estudiadas desde el punto de vista de su fabricación, tipos de dosificación y fabricación que han sido ensayadas.

Las 51 muestras de hormigones de tomas fabricadas en plantas de hormigonado (H), tratan de cubrir la variedad de hormigones que actualmente se encuentran en el mercado canario. Las muestras son probetas normalizadas, realizadas según norma UNE-EN 12390-1 y 2 [11-12], y fabricadas por los laboratorios del Servicio en el ejercicio de su función de laboratorio de control.

Las diecisiete muestras amasadas de dosificaciones en laboratorio (D), son hormigones que han sido elaborados a partir de una dosificación de obra sancionada por la práctica, y donde tanto áridos como cementos y adiciones, han sido caracterizados previamente, según se indica en el anexo II del presente trabajo.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 3.16.-** Identificación, clasificación y características de todas las muestras de hormigón ensayadas.

Código de muestra	Tipo de hormigón	Tipo de cemento	Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Relación agua/cemento (a/c)	Resistencia a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )
H1	HM-20/B/20/I	CEMII/A-P/42,5R	275	0,65	24,49
H2	HM-20/B/20/I	CEMII/A-P/42,5R	250	0,63	12,18
H3	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	344	0,59	29,40
H4	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	344	0,59	29,40
H5	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	350	0,52	37,27
H6	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	340	0,58	37,12
H7	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	340	0,6	44,64
H8	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	340	0,58	35,61
H9	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	350	0,6	54,86
H10	HA-25/F/12/IIa	CEMII/A-P/42,5R	324	0,56	34,33
H11	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	355	0,55	44,84
H12	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	390	0,6	34,05
H13	HA-25/F/12/IIa	CEMII/A-P/42,5R	330	0,58	40,50
H14	HA-25/F/12/IIa	CEMII/A-P/42,5R	330	0,58	34,50
H15	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	325	0,6	59,44
H16	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	300	0,78	24,80
H17	HA-25/B/20/IIa	CEMIV/B-P/32,5N	300	0,56	20,25
H18	HA-25/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	370	0,47	30,49
H19	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	380	0,47	27,43
H20	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	300	0,76	29,87
H21	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	300	0,76	27,78
H22	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	240	0,73	23,83
H23	HA-25/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	240	0,73	22,46
H24	HA-30/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	380	0,48	42,77
H25	HA-30/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	380	0,48	42,77
H26	HA-30/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	425	0,49	39,50
H27	HA-30/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	350	0,5	57,75
H28	HA-30/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	385	0,5	45,75
H29	HA-30/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	390	0,5	58,55
H30	HA-30/F/20/IIIC+Qb	II/A-P/42,5R MR	395	0,45	43,46
H31	HA-30/F/20/IIIC+Qb	II/A-P/42,5R MR	385	0,45	35,06
H32	HA-30/F/20/IIIa	II/A-P/42,5R MR	370	0,5	34,28
H33	HA-30/B/20/IIIa	II/A-P/42,5R MR	360	0,6	38,99
H34	HA-30/B/20/IIIa	CEMI 42,5 R	350	0,48	24,32

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			28/06/2017 13:22:04

**Tabla 3.16.-** Identificación, clasificación y características de todas las muestras de hormigón ensayadas (continuación).

Código de muestra	Tipo de hormigón	Tipo de cemento	Contenido de cemento (kg/m³)	Relación agua/cemento (a/c)	Resistencia a 28 días (N/mm²)
H35	HA-30/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	370	0,5	38,28
H36	HA-30/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	360	0,5	42,54
H37	HA-30/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	360	0,5	42,50
H38	HA-30/F/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	365	0,5	48,07
H39	HA-30/B/20/IIa	CEMII/A-P/42,5R	300	0,56	24,79
H40	HA-30/B/20/I	CEMII/A-P/42,5R	300	0,65	32,26
H41	HA-30/B/20/IIIa	CEMII/A-P/42,5R	300	0,5	40,14
H42	HA-30/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	375	0,6	32,28
H43	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	375	0,55	34,62
H44	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	300	0,55	45,16
H45	HA-30/B/20/IIIa	II/A-P/42,5R MR	325	0,51	51,26
H46	HAF-35/P/AC/11/IIa	CEMII/A-P/42,5R	380	0,6	42,78
H47	HAF-35/P/AC/11/IIa	CEMII/A-P/42,5R	380	0,6	48,63
H48	HA-35/B/11/IIa	CEMII/A-P/42,5R	370	0,45	35,17
H49	HA-35/B/11/IIIa	II/A-P/42,5R MR	350	0,51	63,82
H50	HA-50/F/12/IIa	CEMII/A-P/42,5R	500	0,48	57,99
H51	HA-50/B/20/IIa	CEMI 52,5 N	380	0,48	51,24
D1P	HA-35/B/20/IIIa	II/A-P/42,5R MR	325	0,51	57,00
D2P	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,76	38,14
D2F	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,73	28,81
D2PZT	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,73	31,22
D2PV	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,73	28,71
D2HS	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,73	42,15
D3P	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	300	0,56	52,79
D3F	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,58	42,65
D3PZT	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,57	51,34
D3PV	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,58	43,00
D3PZC	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,57	50,00
D3HS	HA-30/B/20/IIb	II/A-P/42,5R MR	240+60	0,57	55,10
D4F	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,73	38,32
D4PZT	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,73	46,54
D4PV	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,73	39,87
D4PZC	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,73	43,72
D4HS	HA-25/B/20/IIa	II/A-P/42,5R MR	300	0,73	45,14

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 3.2. Ensayos de laboratorio realizados.

Los ensayos inicialmente planteados en este trabajo tanto para morteros como para los hormigones son:

- Ensayo de morteros. Resistencia a flexión y compresión a 28 días según UNE-EN 1015-11 [10].
- Ensayo de hormigones. Resistencia a compresión a 28 días según UNE-EN 12390-3 [14].
- Ensayo de determinación de la consistencia fresca o asentamiento mediante el cono de Abrams, según UNE EN 12350-2 [15].
- Ensayo de hormigón. Densidad del hormigón endurecido UNE-EN 12390-7 [16]
- Ensayo sobre morteros y hormigones. Resistividad eléctrica. Método directo (Resistividad Directa) según UNE 83988 [17].
- Ensayo sobre morteros y hormigones. Resistividad eléctrica. Método de las cuatro puntas o Wenner (Resistividad Indirecta) según UNE 83988 [18].
- Ensayo sobre hormigones. Profundidad de penetración de agua bajo presión según UNE 83309-90 [19] y EN 12390-8 [20].
- Ensayo sobre morteros y hormigones. Porosidad por intrusión de mercurio según ASTM D 4404-84- Reaprobada en 1998 [21].
- Ensayo de porosidad accesible, según UNE-EN 1936 [22] y según UNE 83980-14 [23].
- Ensayo sobre morteros y hormigones. Medida de la carbonatación natural a los 90 días según UNE 112011-94 [24], UNE 112011:2011 [25] y UNE 83993-1 [26].
- Ensayo sobre morteros y hormigones. Medida de la carbonatación el método acelerado UNE 83993-2 [27].
- Medida de la penetración de cloruros a través del dispositivo "Piscina" según PrUNE 83986 [28] y CEN/TS 12390-11 [29].
- Determinación del contenido de cloruros en hormigón endurecido según UNE-EN 14629 [30].
- Ensayo multirregimen UNE 83993-1 [31].
- Ensayo integral UNE 83993-1 [32] y resistencia de polarización UNE 112072 [33].

Cada una de estas normas serán explicadas brevemente con la idea de describir los procedimientos de ensayo utilizados sobre los que se obtienen los resultados presentados en capítulos posteriores.

#### 3.2.1. Resistencia a flexión y compresión de morteros y pastas de cementos.

La resistencia a flexión y compresión de las probetas de mortero se realizaron según la UNE EN 1015-11 [10], mediante máquinas de ensayo controladas por ordenador. Cada probeta prismática de 40x40x160 mm es ensayada a flexión aplicando una carga centrada a una velocidad de 50 N/s sobre la probeta

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280		Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

biapoyada, como muestra la figura 3.10, con una luz de 100 mm, determinando su resistencia a flexión ( $R_f$ ) en MPa según la ecuación (3.1):

$$R_f = \frac{F_c}{l \cdot b} \quad (3.1)$$

donde:

- $F_c$  es carga máxima de rotura aplicada (N).
- $l$  es distancia entre soportes (100 mm).
- $b$  es lado de la sección cuadrada de la probeta (40 mm).

Del ensayo de flexión se obtienen dos mitades que posteriormente se ensayan a compresión aplicando una carga sobre las caras laterales (moldeadas) en una superficie de 40x40 mm (figura 3.11) a una velocidad de 160 N/s (a diferencia de los 2400±200 N/s que indica la norma correspondiente debido a un error en la programación de la prensa en la primera serie de ensayos, pero que se mantuvo en el resto de las determinaciones), obteniendo la resistencia a compresión ( $R_c$ ) en MPa según la expresión (3.2):

$$R_c = \frac{F_c}{S_c} \quad (3.2)$$

donde:

- $F_c$  es la carga máxima a rotura aplicada (N).
- $S_c$  es superficie de los platos de carga (= 40 mm x 40 mm = 1600 mm<sup>2</sup>).



**Figura 3.11.-** Ensayo a flexión (izquierda) y ensayo a compresión (derecha) de morteros.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 3.2.2. Resistencia a compresión de hormigones.

Este ensayo describe la resistencia a compresión del hormigón endurecido, siguiendo la norma UNE EN 12390-3 [14] que está recogida en la normativa actualmente vigente en España, la Instrucción EHE-08 [13], más concretamente en su artículo 31 en el que se establece que la resistencia del hormigón se comprueba mediante esta norma, siendo la edad característica de rotura exigida la resistencia a compresión media calculada de dos probetas a la de 28 días.

El ensayo consiste en aplicar mediante una prensa o máquina de ensayo que cumpla los requisitos de la norma UNE EN 12390-4 [34], una fuerza de carga por unidad de superficie, a una velocidad constante hasta la rotura de la probeta.

Primeramente, tras sacar la probeta de ensayo de la cámara húmeda se realiza una preparación previa de la probeta de ensayo que consiste en un secado inicial del exceso de humedad superficial, durante una o dos horas. Para garantizar una aplicación de la carga de forma homogénea durante todo el proceso de rotura, se realiza una rectificación de la cara de llenado de las probetas mediante un pulido. Tras el paso por la pulidora (figura 3.12) se conseguirá crear un paralelismo entre la cara superior e inferior, eliminando de la cara superior cualquier irregularidad que lo impida.

Antes de proceder a cada rotura se realizan comprobaciones básicas de limpieza y ajuste de los platos de carga en la prensa. Se coloca la probeta centrada respecto de los platos y en la dirección del hormigonado. Se selecciona una velocidad de aplicación de carga entre 0,2 a 1 MPa/s, en nuestro caso la prensa aplica la fuerza de carga de forma constante y sin choques, a una velocidad de 1000 kg, hasta alcanzar la fuerza o carga de rotura máxima, medida en Newton (N) (figura 3.13).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

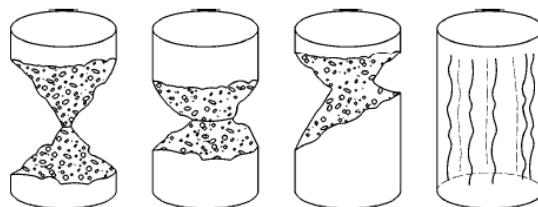


**Figura 3.12.-** Maquina de pulido.



**Figura 3.13.-** Prensa de compresión de probeta de hormigón de 15x30.

Tras la rotura se realiza una valoración del tipo de rotura, determinando si es satisfactoria o no, según la norma UNE EN 12390-3[14]. Las roturas consideradas como satisfactorias son las que se muestran en la figura 3.14.



**Figura 3.14.-** Valoración de roturas extraídas de la norma UNE EN 12390-3 [14].

El cálculo de la resistencia a compresión en MPa ( $N/mm^2$ ) según la ecuación (3.3):

$$R_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (3.3)$$

donde:

- $R_c$  es el resultado de la resistencia a compresión ( $MPa$  o  $N/mm^2$ ).
- $F_c$  es la carga máxima en rotura aplicada ( $N$ ).
- $A_c$  es el área transversal de la probeta sobre la que se aplica la fuerza de compresión ( $mm^2$ ).

### 3.2.3. Ensayo de determinación de la consistencia fresca o asentamiento, mediante el cono de Abrams.

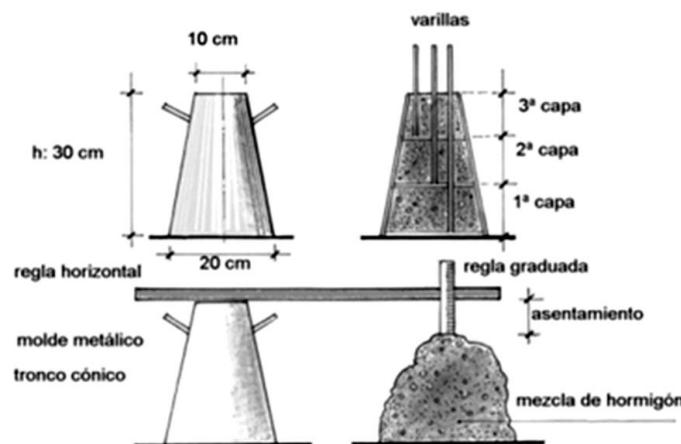
Este ensayo es un método para determinar la consistencia de un hormigón en estado fresco, ya que el asentamiento del cono es sensible a los cambios de consistencia del hormigón. La norma UNE EN 12350-2 [15] establece la posibilidad de medir asentamientos entre 1 y 21 cm, y a estos valores la EHE en su artículo 31.5, le asigna una definición de docilidad según su consistencia (tabla 3.17).

**Tabla 3.17.-** Tipo de consistencia según el asentamiento del cono de Abrams.

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

La instrucción comenta que se deben evitar las consistencias seca y plástica, y que la consistencia líquida solo en casos justificados, con el uso de superfluidificantes. El ensayo se realiza rellenando de hormigón un molde tronco cónico, que previamente debe ser humedecido. El llenado se realiza de tres veces, de modo que cada tercio de llenado se compacta con 25 golpes de una barra compactadora, de forma distribuida en toda la sección. Tras el llenado de las tres capas y nivelado de la capa superior hasta el molde, este último se levanta con cuidado de forma vertical (figura 3.15).



**Figura 3.15.-** Esquema del proceso de fabricación del Cono de Abrams, extraído de la norma UNE EN 12350-2 [15].

La medida de asentamiento se toma colocando el molde troncocónico y tomando la diferencia de altura entre el molde y la muestra de hormigón (figura 3.16).



**Figura 3.16.-** Imagen de una muestra real ensayada mediante cono de Abrams.

### 3.2.4. Ensayo de determinación de la densidad del hormigón fresco y endurecido.

En hormigones que poseen el mismo tipo de naturaleza de árido y granulometría, la densidad es un indicativo de la porosidad por la relación agua/cemento, de la resistencia y de la durabilidad, de manera que a mayor densidad mayor compacidad, menor volumen de huecos. El ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 12390-3 [16], en la que se calcula la densidad usando el valor de la masa de la probeta y su volumen, según la ecuación (3.4)

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

donde:

- $\delta$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
- $m$  es la masa (kg)
- $V$  es el volumen ( $\text{m}^3$ )

El ensayo consiste en determinar, inicialmente, el volumen geométrico de la probeta cúbica de 10 cm de arista ( $V$ ) en  $\text{m}^3$  y posteriormente la masa de la probeta de hormigón en alguna de las condiciones de ensayo.

Podemos establecer cuatro tipos de densidades, según el estado en el que se encuentre:

- Densidad fresca ( $\delta_f$ ), es la obtenida tras la fabricación de una probeta cúbica de 10 cm, mediante la comparación de pesadas entre el molde vacío y lleno ( $m_f$ ).
- Densidad en las condiciones de recepción ( $\delta_r$ ), con los valores de masa ( $m_r$ ) tras haber realizado el desmoldado de la probeta cúbica a las 24 horas de su fabricación.
- Densidad de cámara húmeda ( $\delta_h$ ), tras un curado de 28 días, y realizándose la pasada de las probetas saturadas ( $m_h$ ).
- Densidad seca ( $\delta_s$ ), es la obtenida tras un proceso de secado en estufa a una temperatura de 100 °C, hasta peso constante( $m_s$ ), una variación de peso inferior al 0,2 % en 24 horas, realizando las pesadas dejando enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente, aproximadamente 1 hora.

### 3.2.5. Penetración de agua bajo presión.

La Instrucción actual EHE-08 [13], propone en su art. 37.3.3, para la comprobación experimental de la impermeabilidad del hormigón el ensayo de penetración de agua bajo presión en los hormigones según las normas UNE 83309-90 [19] y UNE-EN 12390-8 [20]. Este ensayo intenta evaluar si el hormigón fabricado es lo suficientemente impermeable para el ambiente especificado en su identificación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

Este ensayo evalúa a los hormigones de ambientes III y IV (definidos en la tabla 3.18), y el resultado de ensayo debe ser menor a los datos siguientes:

**Tabla 3.18.- Profundidades máximas y medias de la penetración del agua bajo presión según la clase de exposición ambiental.**

<b>Clase de exposición ambiental</b>	<b>Especificaciones</b>	
	<b>Profundidad máxima</b>	<b>Profundidad media</b>
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIC, Qc, Qb (en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

El proceso de ensayo se puede resumir en que se aplica una presión de agua en la cara superior de llenado de una probeta cilíndrica normalizada de 15x30, en un dispositivo de ensayo estanco y que permita una lectura continua de la presión que se está aplicando (500 kPa) durante un tiempo de 72 horas (figura 3.17). Para ello, inicialmente las probetas deben de haber sido acondicionadas, con un curado en cámara húmeda durante un periodo de 28 días, un posterior secado en estufa a 50 °C hasta peso constante y finalmente con un pulido de la cara de ensayo.

Tras el periodo de ensayo, las probetas se rompen en dos mitades, perpendiculares a la cara de ensayo, dejando así visible un perfil de penetración de agua (figura 3.18). En dicha figura se puede ver cómo está marcado el perfil del frente de penetración, para así obtener los datos de la profundidad máxima, como el mayor valor numérico redondeado al mm más próximo, de las profundidades de entre todas las medidas de las probetas y la profundidad media, como el cociente entre el área del frente de penetración y el diámetro de la probeta. Cualquier infiltración o inconveniente producido durante el ensayo, lo invalida.



**Figura 3.17.- Equipo de penetración de agua bajo presión.**

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.18.-** Probeta después del ensayo agua bajo presión. En línea punteada negra se indica el frente de penetración.

### 3.2.6. Ensayo de resistividad eléctrica.

La resistividad, de forma genérica, viene definida como la resistencia eléctrica de un material a oponerse al paso o flujo de la corriente eléctrica, siendo un indicativo de la conductividad de un material, ya que ésta es la inversa de la resistividad. Así, un valor bajo en resistividad indicará que es un buen conductor y uno alto indica que se trata de un mal conductor. Aplicando este principio a una probeta de hormigón endurecido y saturado en agua, la resistividad eléctrica calculada sería un método de medida de forma indirecta del grado de porosidad, tamaño de poros y conectividad, de manera que a menor resultado de resistividad mayor será su porosidad, debido la conductividad de sus poros conectados y llenos de agua.

Se calcula la resistividad a partir de la siguiente expresión (3.5):

$$\rho = R_\rho \frac{s}{l_\rho} \quad (3.5)$$

donde:

- $\rho$  es la resistividad, que se mide en ohmios por metro ( $\Omega \cdot \text{m}$ ).
- $R_\rho$  es la resistencia, expresada en ohmios ( $\Omega$ ).
- $s$  es la sección transversal en metros cuadrados ( $\text{m}^2$ ).
- $l_\rho$  es la longitud en metros (m).

Se plantean dos tipos de ensayos de resistividad:

- a) Resistividad Directa
- b) Resistividad Indirecta o método Wenner.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 3.2.6.1. Resistividad eléctrica. Método directo.

El ensayo de resistividad eléctrica mediante el método directo es considerado el método de referencia para la medida de resistividad sobre probetas de hormigón endurecido y saturado.

El ensayo se describe en la norma UNE 83988-1 [17] y consiste en la medida de la resistencia eléctrica de las muestras de probetas cilíndricas de hormigón endurecido, al aplicárseles un campo eléctrico uniforme mediante el contacto por sus dos bases de dos electrodos.

Las probetas serán fabricadas según la UNE EN 12390-2 [12] y conservadas durante el tiempo de curado en balsa dentro de la cámara húmeda, de forma que sus poros estén saturados en el momento del ensayo, y teniendo la precaución de que las probetas nunca pasen fuera antes del ensayo un tiempo superior de 5 min.

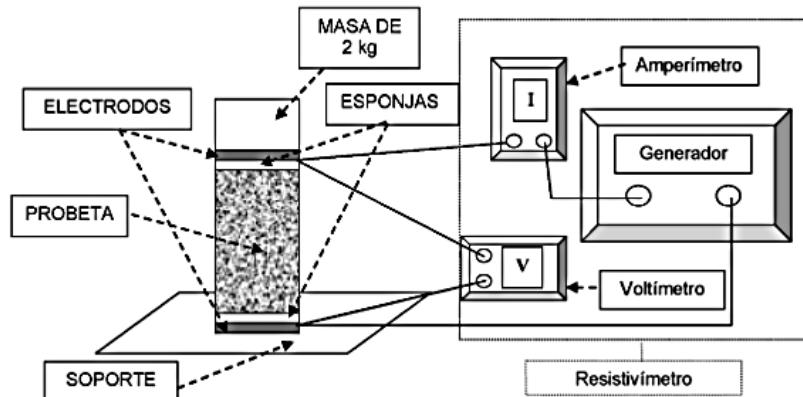
Como equipo de medida o resistivímetro, la norma propone dos multímetros externos para la lectura de la intensidad ( $I$ ) y la tensión ( $V$ ) y una fuente, recomendando una fuente de corriente alterna tal que haga que circulen entre 30 y 50 mA, pero en la totalidad de nuestros ensayos se ha utilizado una fuente continua regulable de 0 a 30 V, de modo que en medidas de resistividad a edades tempranas si se han podido realizar las medidas con el salto de potencial recomendado, pero con mayores edades esto no se puede cumplir, ya que los poros se van cerrando y la probeta cada vez se hace más resistente al paso de la corriente.

Para la realización del ensayo los electrodos que se utilizan deben ser de un metal conductor libre de impurezas, siendo nuestra elección dos chapas de cobre de diámetro igual al diámetro de las probetas de ensayo. Para garantizar un contacto entre las superficies de la base de la probeta y el electrodo se coloca un paño de algodón espesor menor de 5 mm.

En la figura 3.19 se muestra un esquema del montaje del dispositivo de medida de resistividad. Para realizar una medida se han de seguir los siguientes pasos: colocar el electrodo inferior sobre un soporte inerte, y entre los electrodos y la probeta unos paños o esponjas, y sobre el electrodo superior una masa de 2 kg. El voltímetro se conecta tanto al electrodo superior como al inferior; y el amperímetro se conecta al electrodo superior y al positivo de la fuente o generador, y el negativo se conecta con el electrodo inferior.

El ensayo se realizará en condiciones controladas, a una humedad mayor del 45% y una temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.19.-** Esquema del montaje del dispositivo del método directo de medida o resistivímetro, extraído de la norma UNE EN 83988-1 [17].

Antes de realizar el ensayo se debe tener la precaución de eliminar el agua sobrante que provenga tanto de la probeta recién sacada del tanque como de las esponjas o paños saturados, para que la medida no este influenciada por la conductividad del agua en exceso. Antes de cada tanda de medidas de resistividad eléctrica de la probeta de hormigón, hay que medir la resistencia de los paños o esponjas solas, ya que esta resistencia se le restará a la conjunta del montaje, sabiendo que se calcula aplicando una corriente hasta una diferencia de potencial, una vez estabilizada la medida (normalmente en unos 10 s), de aproximadamente 40 mA. Esta resistencia eléctrica de las esponjas ( $R_{sp}$ ) está limitada por debajo de los 100  $\Omega$ . En la figura 3.20. se muestran dos fotos del dispositivo de medida.



**Figura 3.20.-** Dispositivo experimental de medida del método directo o resistivímetro aplicado a las esponjas (izquierda) y a la probeta (derecha).

En el procedimiento experimental llevado a cabo se realiza una medida de la diferencia de potencial entre los electrodos ( $V_i$ ) sin la conexión de la corriente, como se muestra en la ecuación (3.6) dicha medida no está contemplada en la norma, pero en base a la experiencia adquirida es necesaria esta medida correctora.

Se realizan dos medidas de la resistividad de la probeta de ensayo ( $R_{e+sp}$ ), para ello se conecta la fuente o generador, aumentando progresivamente el voltaje hasta que por el circuito circulen aproximadamente 40 mA, y tomando las medidas de intensidad y diferencia de potencial cuando estén estabilizadas, después de aproximadamente unos 10 s.

Los cálculos de la resistencia eléctrica según la Ley de Ohm, se realizan mediante las ecuaciones siguientes (3.6 y 3.7):

$$R_e = \frac{V}{I} \quad (3.6)$$

$$R_e = \frac{(V - V_i)}{I} \quad (3.7)$$

donde:

- $R_e$  es la resistencia eléctrica del hormigón ( $\Omega$ ).
- $I$  es la intensidad eléctrica que circula por el circuito (A).
- $V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos (V).
- $V_i$  es la diferencia de potencial sin conexión de la corriente (V).

sabiendo que, como se ha comentado con anterioridad, a la resistencia eléctrica del hormigón hay que restarle la resistencia de las esponjas o paños de contacto, como muestra la ecuación (3.8)

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad (3.8)$$

donde:

- $R_e$  es la resistencia eléctrica del hormigón ( $\Omega$ ).
- $R_{e+sp}$  es la resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas o paños de contacto ( $\Omega$ ).
- $R_{sp}$  es la resistencia eléctrica de las esponjas o paños de contacto ( $\Omega$ ).

Para el cálculo de la resistividad eléctrica, se multiplica la resistencia eléctrica del hormigón por una constante de celda, según las ecuaciones (3.9 y 3.10):

$$\rho_e = k \cdot R_e \quad (3.9)$$

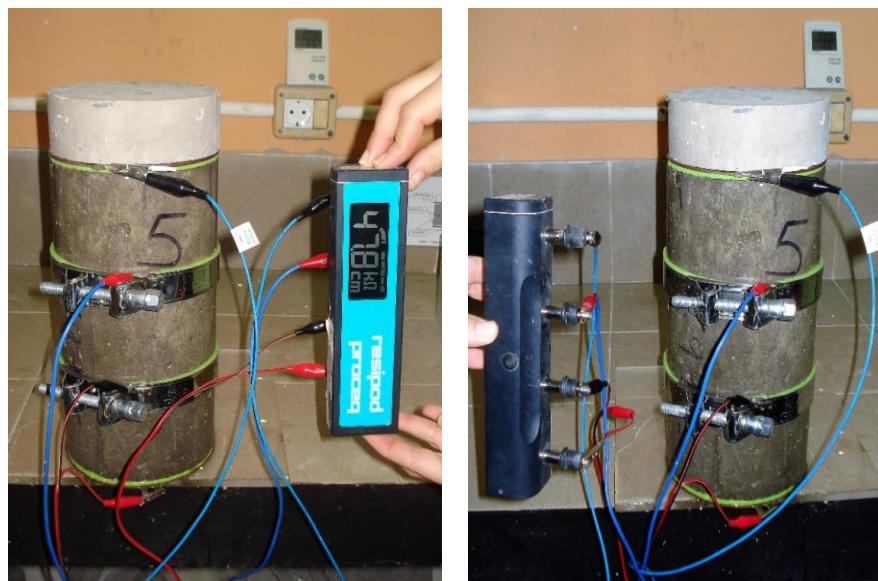
$$k = \frac{S_e}{L_e} \quad (3.10)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

donde:

- $\rho_e$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot m$ ).
- $k$  es la constante de celda (m).
- $R_e$  es la resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).
- $S_e$  es el área de la cara de la probeta de contacto con las esponjas y electrodos ( $m^2$ ).
- $L_e$  es la altura de la probeta de ensayo (m).

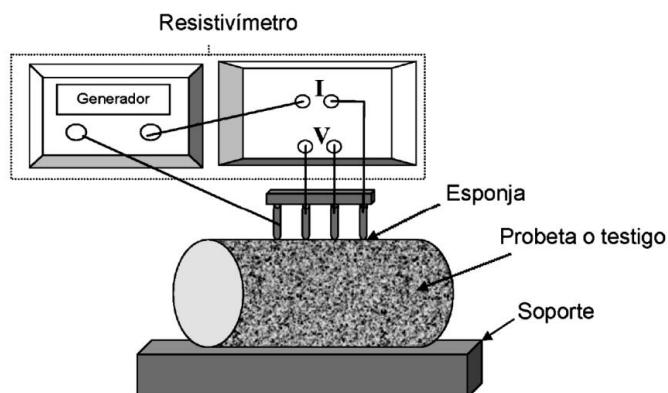
Según las últimas informaciones sobre la evolución de esta norma a nivel europeo, se está proponiendo una adaptación del ensayo de resistividad directa anterior, en el que se sustituye el uso de los dos multímetros y la fuente, por el uso del equipo comercial de medida de resistividad indirecta (en nuestro caso resipod) y dos arandelas o abrazaderas situadas a un tercio y dos tercios de la altura de la probeta. A estas dos abrazaderas se les colocan unas esponjas para que el metal haga un buen contacto con la superficie del hormigón. Las dos posiciones del voltaje, del equipo comercial de resistividad indirecta, se conectan mediante cables a las arandelas. Mientras que las dos posiciones extremas de intensidad del equipo se conectan con la placa de cobre superior e inferior que forman parte del ensayo de resistividad directa, tal y como se muestra en la figura 3.21.



**Figura 3.21.-** Adaptación del ensayo de resistividad directa mediante abrazaderas.

### 3.2.6.2. Resistividad eléctrica. Método de cuatro puntas o de Wenner.

El ensayo de la resistividad por el método de las cuatro puntas de Wenner es también conocido como el método de resistividad indirecta. Se ha realizado tanto sobre las muestras de mortero como sobre las de hormigón endurecido, siguiendo las indicaciones de la norma UNE 83988-2 [18]. En este segundo ensayo de resistividad se mide con un resistivímetro capaz de aplicar una corriente estable, mediante el contacto con la muestra de cuatro electrodos alineados en una generatriz, aplicando una corriente entre dos electrodos situados a los extremos en un eje y para medir el voltaje a través de los dos electrodos interiores, como se puede ver en el esquema de montaje de la figura 3.22.



**Figura 3.22.-** Esquema de medida de la resistividad con el método de las cuatro puntas, extraído de la norma UNE 83988-2 [18].

La norma recomienda aplicar una corriente alterna de intensidad hasta 40 mA entre dos electrodos externos. Para la campaña de ensayos de la presente tesis se han utilizado dos aparatos: un resistivímetro comercial denominado resipod de la marca proceq y otro de fabricación propia (figura 3.23). Este último está fabricado con metacrilato, empleando como electrodos cuatro barras de acero (libres de óxidos) de diámetro 6 mm con una separación de 50 mm y cuyo alimentador de corriente estable ha sido una pila de potencia de 9 V. Se coloca en los cuatro electrodos unas esponjas que se humedecen para garantizar el contacto con el hormigón.

Los dos equipos han sido debidamente calibrados mediante el empleo de un circuito eléctrico o placa de calibración, en la que la medida de calibración de los instrumentos debe dar lecturas de  $120 \pm 2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.23.-** Esquema de medida de la resistividad con el método de las cuatro puntas de elaboración propia (izquierda) y un equipo industrial (derecha).

Para las probetas de ensayo de mortero y hormigón endurecido, se eligieron dos tipologías distintas, siendo un grupo de ellas de dimensiones normalizadas de 15x30 y otro grupo de dimensiones más pequeñas (probetas cilíndricas de 10x20). Ambas tipologías de probeta fueron tratadas de la misma forma, en cuanto a su fabricación y curado en balsa con agua potable para que estuviesen totalmente saturadas, a una temperatura de  $20\pm 2$  °C, dentro de una cámara húmeda.

El cuarto dispuesto para la realización de los ensayos ha de estar acondicionado a una temperatura de  $20\pm 2$  °C y a una humedad mayor de 45%. Para el ensayo de resistividad la superficie de medida de la probeta debe estar ligeramente humedecida y el resultado será la media de 6 medidas a lo largo de la probeta en diferentes puntos equidistantes a lo largo de los 360° de su perímetro. Con el resistivímetro propio, con el fin de mejorar y garantizar un buen contacto entre las barras de acero y la probeta de hormigón, se colocaron en los electrodos esponjas humedecidas.

Al igual que en el caso de la medida de la resistividad directa, la norma no plantea realizar una medida correctora que sí consideramos en nuestros ensayos: la medida de la diferencia de potencial entre los electrodos ( $V_i$ ) sin la conexión de la corriente. La ecuación (3.11) permite determinar la resistividad mediante el método de Wenner, a partir del cálculo genérico de la ley de Ohm y la resistividad eléctrica en un medio semiinfinito, ecuación (3.12), con un factor geométrico:

$$\rho_w = R_e \cdot F_g \quad (3.11)$$

$$F_g = 2 \cdot \pi \cdot a \quad (3.12)$$

donde:

- $\rho_w$  es la resistividad eléctrica del hormigón mediante el método de Wenner, en ohmios por metro ( $\Omega \cdot m$ ).

- $R_e$  es la resistencia eléctrica, en ohmios ( $\Omega$ ).
- $F_g$  es el factor geométrico, (m).
- $a$  es la distancia entre las puntas de los electrodos del resistivímetro (m).

Las ecuaciones anteriores son para un cálculo semiinfinito, pero en realidad las probetas tienen unas dimensiones finitas, por lo que hay que aplicar un factor de forma al factor geométrico. Así el cálculo de la resistividad eléctrica de las probetas quedará definido por la ecuación (3.13):

$$\rho_{\text{probeta}} = \rho_w \cdot F_f \quad (3.13)$$

donde:

- $\rho_{\text{probeta}}$  es la resistividad eléctrica de las probetas ( $\Omega \cdot \text{m}$ ).
- $\rho_w$  es la resistividad eléctrica del hormigón mediante el método de Wenner ( $\Omega \cdot \text{m}$ ).
- $F_f$  es el factor de forma, según la siguiente tabla 3.19

**Tabla 3.19.-** Factor de forma según el tipo de probeta.

Probetas cilíndricas	Distancia entre puntas, $a = 0,05 \text{ m}$
15x30 cm	0,606
10x20 cm	0,377

### 3.2.7. Determinación de la porosidad por intrusión de mercurio.

La porosidad es un parámetro importante que está relacionado directamente con la resistencia mecánica y el transporte o difusión de cualquier agresivo.

La porosidad de los materiales se ha determinado mediante de método de intrusión de mercurio (MIP), siguiendo la recomendación de la norma ASTM D4404 [21], utilizando el porosímetro PORESIZER de la casa Micromeritics, perteneciente al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) de la Universidad de La Laguna. Este ensayo posibilita estimar la distribución del tamaño de poros en la microestructura de las muestras en un rango de diámetros entre 400 y 0,003  $\mu\text{m}$ , en unidad % de volumen total. La muestra primeramente se seca en estufa 48 h antes del ensayo. Posteriormente se introduce en una cámara donde se le hace vacío, y a continuación se aplica una presión hidrostática con mercurio creciente. Esta presión resulta inversamente proporcional al tamaño de la apertura de poros, el valor de la presión aplicada y el volumen de mercurio introducido en los poros durante el proceso de llenado, se representan mediante gráficas y valores porcentuales, acumulativos y diferenciales, según la ecuación (3.14):

$$P = \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{d} \quad (3.14)$$

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

donde:

- $d$  es el diámetro equivalente de los poros ( $\mu\text{m}$ ).
- $\gamma$  es la tensión superficial del mercurio ( $\text{N/m}$ ).
- $\theta$  es el ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes del poro.
- $P$  es la presión a la que el mercurio es introducido en el poro (MPa).

La muestra ensayada es cilíndrica, de 1 cm<sup>3</sup>, fue extraída de probetas utilizadas en otro ensayo, sin que la muestra sufriese deterioro (figura 3.24)



**Figura 3.24.-** Muestras de hormigón para el ensayo de porosidad por intrusión de mercurio.

La porosidad se puede clasificar como alta (porosidad >15%), media (porosidad entre 10 y 15% ambos incluidos), y baja (<10%).

### 3.2.8. Determinación de la porosidad accesible de agua.

Este ensayo describe el método para determinar la porosidad abierta en piedras naturales y también definida como porosidad accesible al agua del hormigón. El ensayo se extrae de las normas UNE-EN 1936 [22] y UNE 83980-14 [23]. En ambas normas el procedimiento seguido consiste en secar hasta masa constante ( $m_1$ ) a una temperatura de 100 °C. A continuación, se colocan las probetas en un recipiente de vacío y se disminuye gradualmente la presión hasta 2,0±0,7 kPa y se mantiene esta la presión 2 h para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de las probetas (figura 3.25). Manteniendo la presión de vacío, se introduce lentamente agua desmineralizada a 20 °C en el recipiente (15 min). Cuando todas las probetas se encuentren sumergidas, se restablece la presión atmosférica en el recipiente y se mantienen en estas condiciones otras 24 h (figura 3.25), tras las cuales se extraen las probetas del recipiente y rápidamente, con un trapo húmedo, se elimina el exceso de agua de la superficie y se pesan las probetas obteniendo la masa saturada ( $m_3$ ). Por último, se pesan las probetas colocándolas en balanza hidrostática, obteniendo así la masa de la probeta sumergida bajo el agua ( $m_4$ ). El resultado de la porosidad abierta se calcula según la expresión (3.15):

$$P_0 = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_4} \cdot 100 \quad (3.15)$$

93

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

donde:

- $P_0$  es la porosidad accesible al agua (%).
- $m_3$  es la masa de agua saturada (g).
- $m_4$  es la masa de la probeta sumergida bajo el agua (g).
- $m_1$  es la masa de probeta seca (g).



**Figura 3.25.-** Equipo de determinación de porosidad accesible por agua. Efecto vacío (izquierda) y proceso de llenado de agua (derecha).

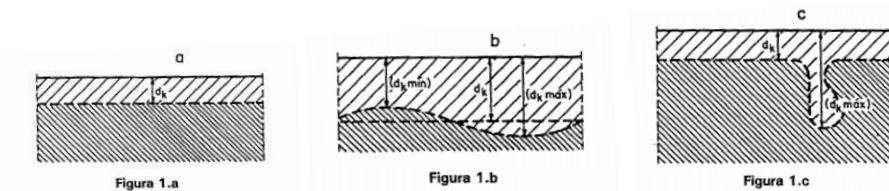
Hay que destacar que el procedimiento de cálculo de la porosidad es similar por ambas normas. La diferencia entre ellas atiende al número de probetas de ensayo por muestra y el volumen de las mismas. En la UNE-EN 1936 los ensayos requieren de seis probetas de volumen de 4x4x4 cm, mientras que en la UNE 83980-14 la muestra la componen dos probetas de peso mayor a 800 g, que en nuestro caso eran las probetas de dimensiones 5x10x10 cm.

### 3.2.9. Determinación de la carbonatación.

Se define como carbonatación a la reacción de los componentes alcalinos, como por ejemplo al hidróxido de calcio que se encuentra en la pasta de cemento, con el dióxido de carbono atmosférico, lo que tendrá como resultado la disminución del valor del pH, y la disminución del poder protector de la capa.

El ensayo de carbonatación se rige por las indicaciones de la norma UNE 112011-94 [24-25], en la que el frente de carbonatación se determina mediante un ensayo colorimétrico, empleando para ello una disolución indicadora, más concretamente fenolftaleína al 1%. De forma genérica, el ensayo consiste en romper o cortar en seco por la mitad a la probeta expuesta a la carbonatación, para seguidamente rociar ambas mitades interiores con el indicador.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.26.-** Esquema de medida de la carbonatación de la UNE 112011-94 [24-25].

La fenolftaleína funciona como indicador de manera que, si el pH del hormigón de la probeta es superior a 9, la zona rociada toma un color rosado o púrpura y, si es menor, se queda incolora (sin cambio de tonalidad). Por tanto, el ensayo colorimétrico muestra dos zonas, una superficial en todo el borde de la probeta que al estar carbonatada permanecerá con su color natural y la zona interior que aún no está carbonatada se volverá de una tonalidad rosada o púrpura. Se debe tener la precaución de pasar poco intervalo de tiempo entre la rotura, el rociado y medido del frente, ya que con el paso del tiempo la tonalidad se perderá, debido a la agresión del CO<sub>2</sub> atmosférico en la superficie de rotura.

La profundidad de carbonatación es la distancia, medida en mm, de la distancia del hormigón carbonatado, donde el CO<sub>2</sub> ha bajado la alcalinidad de la pasta de cemento, medida desde la superficie hasta la zona en la que ya el hormigón no está carbonatado. Según indica la norma, se realizan entre pequeños intervalos de 3 cm en las aristas de las caras laterales y superior, que son las de mayor superficie de exposición (figura 3.27).



**Figura 3.27.-** Medida de la carbonatación de las muestras de mortero (izquierda) y de las muestras de hormigón (derecha).

Las probetas de ensayo pueden ser de diferentes geometrías y, según el caso en el que nos encontremos, pueden ser probetas prismáticas de 4x4x16 cm, probetas cilíndricas de 10x20 ó 15x30 cm, y probetas prismáticas de 15x15x60 ó 10x10x40 cm divididas en tres con el objeto de intentar ensayar la misma probeta. Siempre se ha de cumplir la limitación de la norma de tener caras planas y susceptibles de dividir

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación:
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

por una generatriz, con una base de diámetro o arista superior a 75 mm y longitud mayor o igual a 150 mm.

La determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido se puede realizar mediante dos tipos de exposiciones a la carbonatación:

- el método natural UNE 83993-1[26]
- el método acelerado UNE 83993-2 [27].

Mediante estos ensayos logramos definir la profundidad y velocidad de penetración de la carbonatación de un hormigón endurecido como parámetro indicador de la durabilidad, partiendo de la idea de un avance difusivo del CO<sub>2</sub>, creando una frontera móvil o frente de carbonatación bien definida, que avanzará según su concentración y el tiempo de exposición. Como fundamento de ambos métodos, para cuantificar este fenómeno se aplica la ecuación básica de la raíz cuadrada del tiempo, que es una solución particular para el modelo de difusión, en donde se establece un coeficiente  $V_{CO_2}$  que es la velocidad de penetración del frente de carbonatación en mm/√año. Al ensayar probetas por ambos métodos lograremos correlacionar modelos de carbonatación natural con la acelerada.

La velocidad de avance de la carbonatación en el interior del hormigón se calcula mediante la ecuación (3.16)

$$V_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t_c}} \quad (3.16)$$

donde:

- $V_{CO_2}$  es la velocidad de carbonatación (mm/√año).
- $X_{CO_2}$  es la profundidad media de carbonatación (mm).
- $t_c$  es el tiempo de exposición o de ensayo (años).

### 3.2.9.1. Ensayo de carbonatación. Método natural.

Este ensayo describe un método para la determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido en un ambiente de exposición natural. La estación de exposición atmosférica se ubicó en las instalaciones del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción en Llano del Moro (Isla de Tenerife).

En el ensayo de carbonatación por el método natural, según la UNE 83993-1 [24], se determina la profundidad y velocidad de penetración de la carbonatación en el interior de un hormigón endurecido en un ambiente de exposición natural en un determinado periodo de tiempo.

---

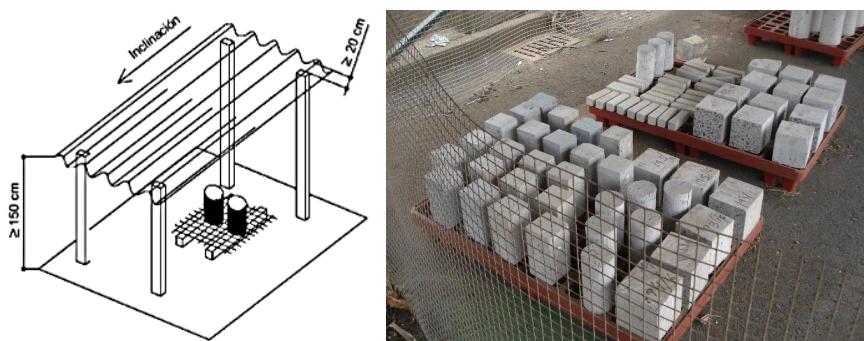
96

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

La norma nos plantea dos sistemas de exposición a la carbonatación: ensayo en el ambiente A o método de referencia y ensayo en el ambiente B o método alternativo que es el seguido en este trabajo.

El ensayo del ambiente B o método alternativo, las probetas se exponen en el exterior, protegidas de la lluvia bajo un recinto (figura 3.28) pero expuestas al ambiente natural de la zona. El recinto debe tener un techo con una pequeña inclinación y no tener paredes laterales para permitir libremente el acceso de aire de la atmósfera. Han de estar dotados de equipos de medición de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>. El procedimiento de ensayo consiste en sacar las probetas de hormigón después de un curado de 28 días y mantenerlas 7 días al aire en ambiente de laboratorio. A continuación, se colocan las probetas en la caja de exposición ambiental, durante un periodo de 90 días. En la zona de ensayo las probetas deben estar separadas entre sí al menos 10 cm y colocadas sobre una rejilla de plástico rígido, de manera que al menos el 90% la superficie de apoyo quede expuesta a la acción del aire con el dióxido de carbono.



**Figura 3.28.-** Recinto para el ensayo de carbonatación en ambiente B, esquema extraído de la UNE 83993-1 [26] (izquierda) y caja de ensayo y muestras expuestas, localizado en las instalaciones del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción (derecha).

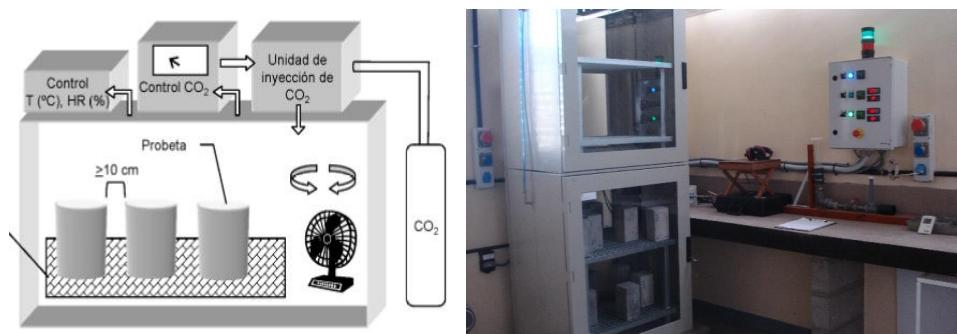
### 3.2.9.2. Ensayo de carbonatación. Método acelerado.

En el ensayo de carbonatación en el hormigón endurecido por el método acelerado, según la UNE 83993-2 [25], se determina la profundidad de penetración de la carbonatación a partir de la exposición de las probetas en una cámara con una concentración de 3% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

La cámara de ensayo, cuyo esquema se muestra en la figura 3.29, dispone de equipos para la medición de humedad y temperatura dentro de la cámara, sistema de control del CO<sub>2</sub>, para mantener la concentración y para facilitar una homogénea distribución la entrada de CO<sub>2</sub> por la parte inferior. La cámara debe ser estanca y

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

permitir exponer las probetas de hormigón a una concentración de CO<sub>2</sub> del 3% ± 0,6% en un ambiente controlado y preestablecido de temperatura 20±2 °C y humedad relativa de 65±5% (figura 3.97).



**Figura 3.29.-** Cámara de carbonatación acelerada: esquema de la cámara extraído de la UNE 83993-2 [25] (izquierda) y cámara de ensayo de carbonatación acelerada (derecha).

El procedimiento de ensayo se realiza por duplicado y consiste en sacar las probetas de hormigón después de los 28 días de curado para someterlas a un preacondicionamiento de otros 28 días. Este preacondicionamiento consiste en realizar un secado a 40 °C durante una semana y posteriormente para hacer desaparecer los gradientes de secado, conservarlas selladas a 20 °C durante tres semanas. Después de este periodo se colocan las probetas en la cámara de carbonatación durante 14 días siguiendo las indicaciones de la norma UNE 112011[24-25] para, una vez pasado ese periodo, medir la profundidad de carbonatación de forma similar a la descrita para la carbonatación natural, obteniendo la velocidad de avance de la misma a los 14 días mediante la ecuación simplificada (3.17)

$$V_{CO_2, 3\%} = 5,16 \cdot X_{CO_2, 3\%} \quad (3.17)$$

donde:

- $V_{CO_2, 3\%}$  es la velocidad de carbonatación acelerada al 3%, (mm/√año)
- $X_{CO_2, 3\%}$  es la profundidad media de carbonatación acelerada al 3%, (mm).

### 3.2.10. Determinación de la penetración de cloruros.

La penetración de cloruros en los hormigones es un parámetro de durabilidad muy importante. A través de diferentes ensayos se pretende determinar los coeficientes de difusión de cloruros en las muestras, de tal forma que a partir de la magnitud de este coeficiente se podrá determinar la durabilidad de las muestras frente a la acción de los cloruros, pudiendo así comparar la calidad y durabilidad de diferentes hormigones.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Los ensayos de penetración de cloruros son:

- Ensayo de inmersión en piscina.
- Ensayo multirregimen.
- Ensayo del método integral acelerado y su versión modificada.

### 3.2.10.1. Ensayo de Inmersión en piscina.

La medida de penetración de cloruros mediante la inmersión en piscina, es un ensayo que se fundamenta en el proyecto de norma PrUNE 83986 [28]. En ella se caracteriza al hormigón según sea el avance de los iones cloruros por difusión natural.

El ensayo se realiza sobre probetas normalizadas, en el caso de los morteros probetas cúbicas de 10 cm de arista y en el caso del hormigón probetas cilíndricas de 15x30, que han sido curadas 28 días sumergidas en agua y a una temperatura de 20 °C. Las probetas de hormigón son talladas, de forma que se ensaya la cara resultante de un corte en el tercio inferior de la probeta. El ensayo consiste en colocar a la muestra un tubo de PVC a modo de dispositivo de piscina, sellado con silicona, de manera que contenga de manera estanca una disolución al 3% de NaCl (figura 3.30). Esta disolución se mantiene durante el periodo de 90 días, conservando las muestras en bolsas cerradas para evitar su evaporación. Transcurrido el periodo de ensayo, la piscina es retirada y se extrae un testigo de 100 mm de diámetro de la zona central de exposición (figura 3.31). Este testigo es el que se incorpora al sistema de molido milímetro a milímetro mediante el uso de una fresadora para la obtención de un polvo, sobre el cual se definirá el perfil de penetración de cloruros.



**Figura 3.30.- Dispositivos de “piscina” en morteros.**

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.31.-** Extracción del testigo a una probeta de hormigón (izquierda) equipo de fresado mm a mm para extraer muestras para su posterior análisis (derecha).

El polvo extraído se conserva hasta su ensayo perfectamente identificado y cerrado. Posteriormente se cuantifica el nivel de cloruros presente en ellos.

La segunda parte del ensayo, basado en la norma UNE EN 14629 [30], consiste en la determinación del contenido de cloruros solubles al ácido, y como cada muestra corresponde a una misma probeta a distintas profundidades, el resultado final del ensayo será un perfil del avance de los cloruros. El método se resume en un acondicionamiento de las muestras mediante secado en estufa a 105 °C hasta masa constante, para posteriormente dejarlas enfriar en un desecador. A continuación, se disuelven entre 1 y 5 g de muestra en 50 mL de agua destilada y 10 mL de ácido nítrico 0,5 M en un vaso de 250 mL, seguido de una adición de 50 mL de agua destilada caliente. Esta disolución se lleva a ebullición, manteniéndose al menos 3 min, y siendo agitada continuamente. El resultado es filtrado inmediatamente.

Para la cuantificación del contenido de iones cloruro, se ha utilizado el Método de Volhard (método A de la norma). En este método, a la disolución de la muestra a ensayar se añade 5 mL de nitrato de plata 0,1 M con una pipeta y a continuación se agitan vigorosamente con el objeto de que precipiten los iones cloruros. Como generalmente se ensayan muestras con alto contenido de cloruros, se añade un agente floculante (3,5,5-trimetilhexanol), con el objeto de evitar que se redissuelva el precipitado. A continuación, se añaden 5 gotas de la disolución indicadora de sulfato férrico de amonio (100 mL de disolución saturada fría de  $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ ) y 10 mL de ácido nítrico diluido. Posteriormente se valora con una disolución de tiocianato de amonio 0,1 M, añadiéndole gota a gota y agitando la disolución hasta que haya un cambio de coloración a naranja-rojo. Se anota el volumen ( $V_1$ ) de la disolución que se ha consumido hasta el cambio de coloración (figura 3.32).

---

100

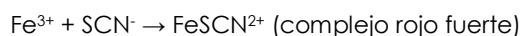
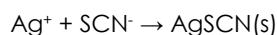
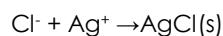
Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.32.-** Valoración del contenido de cloruros.

Las reacciones que han tenido lugar son:



El contenido de cloruros con respecto a la masa de la muestra, se calcula en porcentajes con la ecuación (3.18)

$$C_{\text{Cl}} = 3,545 \cdot f \cdot (V_2 - V_1) / m_{\text{Cl}} \quad (3.18)$$

donde:

- $C_{\text{Cl}}$  es el contenido en cloruros de la muestra.
- $V_1$  es el volumen de la disolución de tiocianato de amonio consumido en la valoración (mL).
- $V_2$  es el volumen de la disolución de tiocianato de amonio consumido en la valoración del blanco (mL).
- $m_{\text{Cl}}$  es la masa de la muestra de hormigón (g).
- $f$  es la molaridad de la disolución de nitrato de plata.

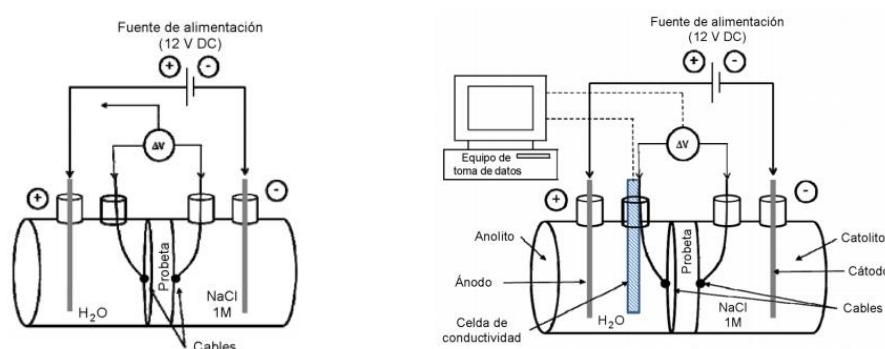
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 3.2.10.2. Ensayo del método multirégimen.

El ensayo denominado método multirégimen, según la norma UNE 83987 [31], es un ensayo acelerado que permite determinar, de una muestra de hormigón endurecido, los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos en los estados estacionario ( $D_s$ ) y no estacionario ( $D_{ns}$ ).

El ensayo se basa en la idea de que los iones de un electrolito, por la acción de un campo eléctrico, migran hacia el polo de carga opuesta a la suya. Así, un hormigón dada su naturaleza cementante y su microestructura porosa se comportará eléctricamente como un conductor.

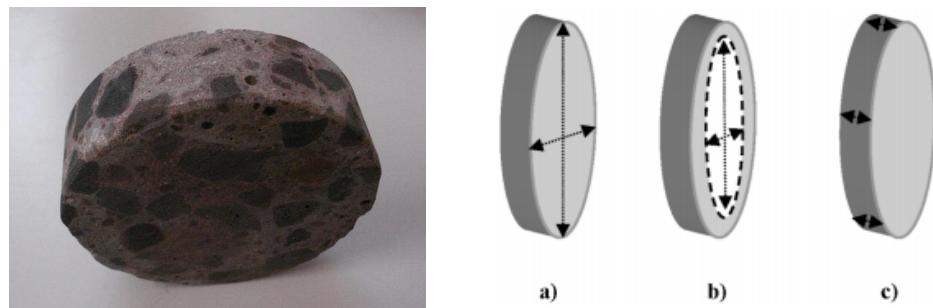
El ensayo consiste en colocar una probeta de hormigón entre dos disoluciones diferentes, una con el electrodo negativo que contiene los iones de cloruro y otra libre de iones cloruros con el electrodo positivo. Al aplicar una diferencia de potencial de 12 V sobre la probeta de hormigón, los iones negativos se ven atraídos hacia el electrodo positivo atravesando la probeta de hormigón (figura 3.33). Se mide el modo de incremento de la concentración de cloruros que atraviese la muestra a partir de la determinación de la conductividad eléctrica. Los coeficientes de difusión de los iones cloruros se calculan tanto en estado estacionario ( $D_s$ ), cuando el flujo de electrones es constante, como en estado no estacionario ( $D_{ns}$ ) cuando es correspondiente con el tiempo de paso ( $t_{paso}$ ).



**Figura 3.33.-** Esquemas de la celda de migración, extraídos de la norma UNE 83987 [31].

Para el ensayo se necesita una muestra de hormigón endurecida, originaria de una probeta normalizada 15x30, que es conservada sumergida en agua ( $20\pm2$  °C) desde que se saca del molde hasta los 28 días. Despues se procede a su cortado y tallado, mediante una cortadora y una máquina extractora de testigos, con el fin de obtener una muestra cilíndrica obtenida del tercio central de la probeta normalizada. La muestra debe tener sus caras paralelas y planas, ser de espesor entre 2 y 3 cm y su diámetro libre de paso de un mínimo de 75 mm (figura 3.34). De cada muestra se mide el espesor (e) en cuatro posiciones espaciadas y el diámetro en dos posiciones perpendiculares del cilindro, y teniendo en cuenta que el sellado de la muestra en la

celda reducirá la sección libre de paso, como se muestra en la figura 3.34 calculando su promedio y definiendo el diámetro  $D$ , todo en mm.



**Figura 3.34.-** Muestra tallada de hormigón (izquierda) y representación esquemática de la muestra de hormigón (derecha), extraída de la norma UNE 83987 [31].

La celda de migración en la que se han realizado los ensayos, se compone de dos materiales, el PVC en la zona central adaptada para la colocación de la muestra y el metacrilato, uniendo los dos materiales de manera estanca. Se forman dos compartimentos, anolito y catolito (figura 3.35).



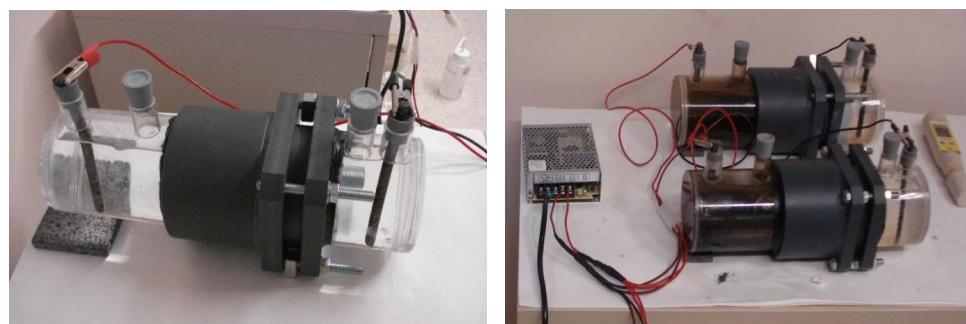
**Figura 3.35.-** Celda de migración empleada en el estudio.

El compartimento positivo, denominado anolito, contiene el ánodo consistente en una barra de acero corrugado y es relleno con agua destilada, determinando su volumen ( $V_a$ ). En el compartimento negativo, denominado catolito, se rellena con una disolución de cloruro sódico a 1 M, registrando su volumen ( $V_c$ ).

Una vez está colocada la muestra en la celda y llenados los compartimentos sin que se produzcan fugas, se conecta a una fuente de alimentación, con un cable al ánodo y otro al cátodo, ajustando un voltaje de 12 V (figura 3.36).

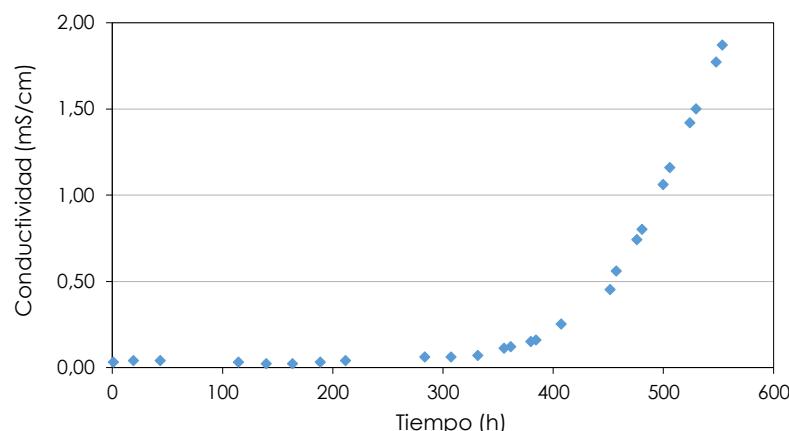
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

En el momento de realizar las lecturas, dos veces al día, se colocan los dos cables del voltímetro en contacto con cada cara de la muestra, de manera que se realice una lectura manual mediante el multímetro de la diferencia de potencial. Otra medida en el momento de ensayo será la conductividad, tomada mediante un conductímetro de piscina.



**Figura 3.36.-** Celdas de medición de la conductividad al principio (izquierda) y final del ensayo con el conductímetro (derecha).

La toma de datos manual del voltaje y la conductividad se realizan periódicamente, siendo suficiente dos veces al día, respetando siempre que la primera medida debe ser después de una hora de iniciado el ensayo. La secuencia de las medidas se resume en que primero se registra la diferencia de potencial efectiva entre ambas caras de la probeta y, seguidamente, se agita la disolución anódica del agua destilada, para finalmente realizar las medidas de temperatura y conductividad del anolito. Tras aproximadamente una media de tres o cuatro semanas de toma de medidas, la recopilación de los datos da lugar a una gráfica del tipo de la figura 3.37.



**Figura 3.37.-** Gráfica de las medidas de conductividad con el tiempo.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Para el tratamiento de los datos y el cálculo de los coeficientes de difusión en estado estacionario ( $D_s$ ) y no estacionario ( $D_{ns}$ ) se realiza la siguiente secuencia de cálculos:

Inicialmente, si es necesario, se realiza una corrección de la conductividad eléctrica ( $c_T$ ) a la temperatura de referencia de 25 °C, ya que la conductividad es un parámetro dependiente de la temperatura, mediante la ecuación (3.19)

$$c_{25} = c_T + 0,02(25 - T) \cdot c_T \quad (3.19)$$

donde:

- $c_{25}$  es la conductividad eléctrica obtenida a los 25 °C (mS/cm).
- $c_T$  es la conductividad eléctrica obtenida a la temperatura de ensayo (mS/cm).
- $T$  es la temperatura en el anolito durante el ensayo (K (°C+273)).

Seguidamente se calcula la cantidad de cloruros en el anolito ( $Cl^-$ ) a partir de los valores de conductividad a la temperatura de ensayo corregida a la de referencia  $c_{25}$ , mediante la ecuación (3.20)

$$Cl^- = 1:10 - 3 \cdot (-1,71 + (11,45 \cdot c_{25})) \cdot V_a \quad (3.20)$$

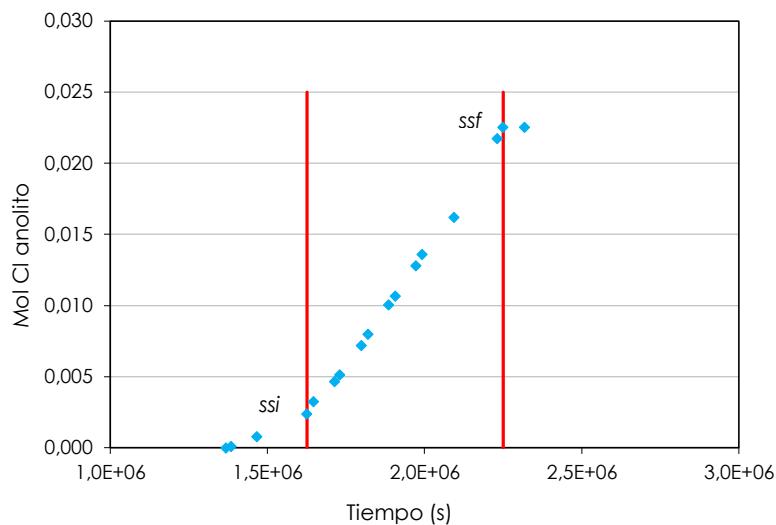
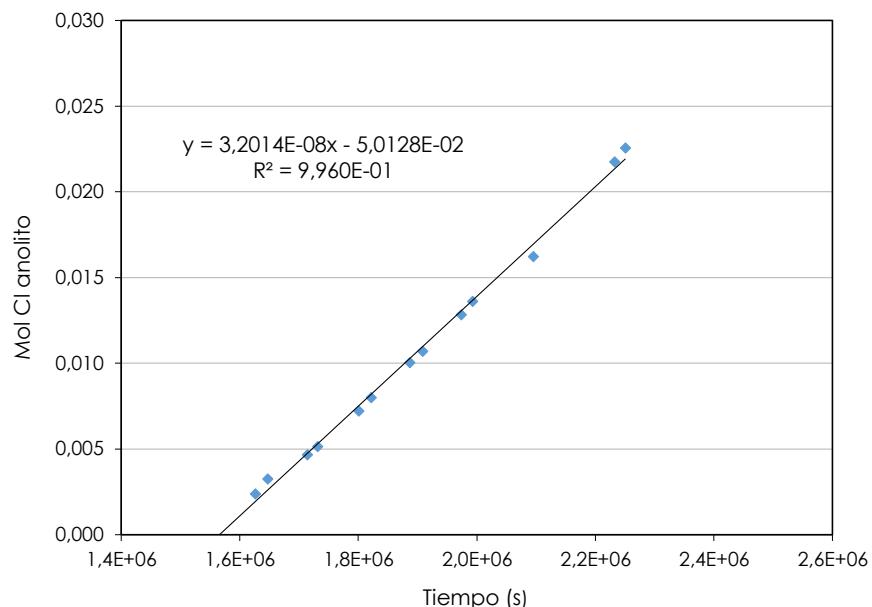
donde:

- $Cl^-$  es la cantidad de cloruros en el anolito (mol).
- $c_{25}$  es la conductividad eléctrica obtenida a los 25 °C (mS/cm).
- $V_a$  es el volumen del anolito (L).

A partir de la representación de la cantidad de cloruros en el anolito (mol) dependiente del tiempo en segundos (s) (figura 3.38), se definen tres etapas, que identifican los períodos del estado estacionario ( $D_s$ ) y no estacionario ( $D_{ns}$ ).

El periodo estacionario ( $D_s$ ), se selecciona en el tramo de aumento lineal de la cantidad de cloruros, entre los puntos de inicio (ssi) y de fin (ssf) de la figura 3.38. Este tramo se hace a través de una regresión lineal de mínimos cuadrados ( $y = Ax + B$ ). La pendiente de la recta, A, es un parámetro a introducir en el cálculo del valor del flujo de cloruros, de al menos 5 cifras decimales. Y La bondad del ajuste ( $R^2$ ) de la regresión lineal ayuda en caso de duda en la identificación del tramo del estado estacionario, según se ve en la figura 3.39.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Figura 3.38.-** Gráfica de la cantidad de cloruros en el anolito con el tiempo.**Figura 3.39.-** Gráfica de la cantidad de cloruros en el anolito con el tiempo, ecuación y  $R^2$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

El cálculo del coeficiente de difusión de cloruros en estado estacionario ( $D_s$ ), viene dado por la ecuación (3.21), obtenida de la modificación de la ecuación de Nernst-Planck

$$D_s = A \cdot R \cdot T \cdot e / z \cdot S \cdot F \cdot Cl \cdot Y \cdot \Delta\Phi_{ss} \quad (3.21)$$

donde:

- $D_s$  es el coeficiente de difusión de cloruros en estado estacionario ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).
- $A$  es la pendiente de la recta, de la regresión lineal del periodo del estado estacionario ( $\text{mol}/\text{s}$ ).
- $R$  es la constante de los gases perfectos ( $1,9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ).
- $T$  es la temperatura media del anolito durante el ensayo ( $K = {}^\circ\text{C} + 273$ ).
- $e$  es el espesor de la probeta (cm).
- $z$  es la valencia del ion cloruro ( $z=1$ ).
- $S$  es el área superficial de la probeta expuesta a la disolución de cloruros ( $\text{cm}^2$ ).
- $F$  es la constante de Faraday ( $\text{cal}/V_{eq} = 23060$ ).
- $Cl$  es la concentración inicial de cloruro en el catolito ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ ).
- $Y$  es el coeficiente de actividad del ion cloruro de la disolución de catolito ( $0,657$ ).
- $\Delta\Phi_{ss}$  es la media de los voltajes efectivos medidos durante el periodo de estado estacionario (V).

El cálculo del coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario ( $D_{ns}$ ), viene dado por las expresiones de las ecuaciones (3.22 y 3.23)

$$D_{ns} = e^2 / 2 \cdot t_{paso} \cdot \varphi \quad (3.22)$$

$$\varphi = (z \cdot F / R \cdot T) \cdot \Delta\varphi \quad (3.23)$$

donde:

- $D_{ns}$  es el coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).
- $e$  es el espesor de la probeta (cm).
- $t_{paso}$  es el tiempo de paso obtenido de la intersección de la recta de ajuste del tramo de estado estacionario con el eje x en la regresión lineal (figura 37).
- $\Delta\varphi$  es el campo eléctrico normalizado ( $\text{V}/\text{cm}$ ) ( $\Delta\varphi = \Delta E/e$ ).
- $F$  es la constante de Faraday ( $\text{cal}/V_{eq} = 23060$ ).
- $R$  es la constante de los gases perfectos ( $1,9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ).
- $z$  es la valencia del ion cloruro ( $z=1$ ).
- $T$  es la temperatura media del anolito durante el ensayo ( $K = {}^\circ\text{C} + 273$ ).

### 3.2.10.3. Método Integral acelerado.

El ensayo Integral acelerado, según la UNE 83992-2 [32], determina la penetración de cloruros en el hormigón, definida por el coeficiente de difusión en

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

estado no estacionario ( $D_{ns}$ ), el tiempo hasta despasivación del acero, la concentración crítica de estos iones que provocan la corrosión de la armadura, así como de la velocidad de corrosión del acero de las armaduras, ( $V_{corr}$ ).

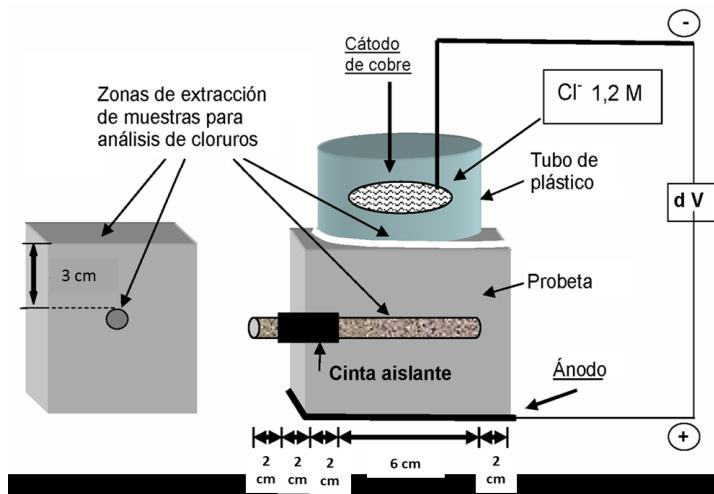
El ensayo consiste en exponer una probeta cúbica de hormigón, que tiene embebida una barra de acero, a una corriente eléctrica a través de dos electrodos colocados en caras opuestas de la probeta. Una de estas caras se pone en contacto con una disolución de cloruro sódico y cloruro de cobre (II), de manera que los iones cloruro migran, de forma acelerada, desde la cara expuesta a la disolución hasta el electrodo de la cara opuesta, encontrando en su camino al acero y desencadenando su corrosión, siendo indicativo del coeficiente de difusión en estado no estacionario ( $D_{ns}$  o aparente  $D_{ap}$ ), el tiempo desde que se conecta el campo eléctrico hasta la despasivación del acero. Una vez detectada la despasivación del acero se rompe la probeta en una zona próxima a la armadura para obtener una muestra de hormigón para analizar la concentración crítica y superficial de cloruros. En una segunda probeta se continua el ensayo hasta producir cierta corrosión del acero para obtener los valores de velocidad de corrosión media ( $I_{corr,media}$ ) o completa ( $I_{corr,completa}$ ) de la barra de acero embebida.

Se trata de un método acelerado, de tal forma que se obtienen datos que permiten predecir el comportamiento de una estructura de hormigón, frente a un agente tan agresivo como los iones cloruro muy presentes en los ambientes marinos, por lo que se convierte en un parámetro tremadamente importante a tener en cuenta en las estructuras de las Islas Canarias.

El ensayo se inicia con la fabricación de dos probetas normalizadas de hormigón objeto del estudio, siguiendo las indicaciones de la norma UNE correspondiente de fabricación y curado. Para ello se han construido unas probetas cúbicas de 10 cm de arista en las que se ha embebido una barra de acero corrugado de diámetro de 8 cm y longitud de 12 cm, a modo de ejemplo de cómo le afectaría el ensayo a una armadura, respetando una distancia de recubrimiento entre 2 y 3 cm (figura 3.40). Estas barras embebidas se han limpiado hasta conseguir una superficie limpia de residuo y óxido. Una vez decapadas se lavan con agua destilada y son secadas en estufa. A continuación, se delimita la zona de las barras que va a ser atacada por los cloruros (unos 6 cm de longitud de la parte posterior que irá embebida) del resto, aplicando cinta aislante (figura 3.40).

Se han utilizado guantes de goma a la hora de manipular el acero para evitar contaminarlo.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.40.-** Esquema de la celda de trabajo. En ella se aprecia el aislamiento de la barra de acero embebida, así como la geometría de la probeta y de la celda de trabajo [32].

Antes de proceder al llenado de las probetas se colocan las barras de acero en la posición prescrita, se rellenan y compactan de manera que se garantice un material homogéneo sin burbujas en su interior, en mesa vibratoria. Se sacan del molde al día siguiente y se guardan en cámara húmeda a humedad  $\geq 95\%$ , curándose durante 27 días.

Unos días antes de finalizar este periodo, se dejan secar las probetas en ambiente de laboratorio 1 o 2 horas, con el objeto de poder colocar en una de las caras un tubo de PVC, el cual se sella con silicona neutra. Cuando esté seca, se rellena el tubo con agua destilada, a manera de prueba de estanquidad previa a la realización del ensayo.

Comprobada la ausencia de fugas y transcurridos los 28 días de curado, se rellena el tubo con una disolución de  $\text{NaCl} 0,6 \text{ M} + \text{CuCl}_2 0,4 \text{ M}$ , hasta alcanzar una altura mínima de 15 cm, con el fin de que el volumen mínimo de disolución sea 0,5 L, intentando que este nivel sea constante durante todo el ensayo.

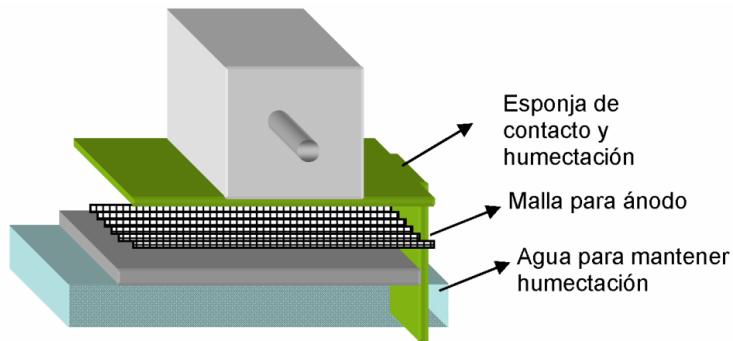
Las dos probetas se colocan sobre unas rejillas de plástico, en una cubeta cuyo fondo se rellena con agua destilada, en una cantidad tal que mantengan la humedad de la esponja que se encuentra colocada entre la cara de la probeta y la rejilla.

Para cada probeta, se colocan dos electrodos; uno, en el tubo, en el seno de la disolución, mediante una placa de cobre (cátodo), y un segundo electrodo que actúa como ánodo, una malla de acero colocada encima de la rejilla de plástico y la esponja que se encuentra en la cara inferior de la probeta (figura 3.41).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.41.- Esquema de colocación de la malla metálica que actuará como ánodo [32]**

Para iniciar el ensayo se conecta una fuente de potencial de 12 V en continuo a ambos electrodos, siendo el polo positivo la malla y el polo negativo el electrodo de cobre. Creando un campo eléctrico constante a lo largo de todo el tiempo del ensayo se acelera la migración de los iones cloruro a través de los poros del hormigón.

Una vez realizado el montaje por completo, se procede a la conexión de la fuente. Teniendo en cuenta que tal y como recoge la norma en la que se describe este ensayo, hay que empezar a tomar los datos cuando la corriente esté estabilizada al cabo de 5 o 15 min, ésta definirá la resistencia eléctrica inicial de la muestra.

La duración del ensayo ( $t$ ) está en función del tiempo que tarda la cantidad límite de cloruros en llegar a la armadura embebida y empezar a corroerla. La despasivación de la armadura se detecta midiendo periódicamente el potencial de la armadura ( $E_{corr}$ ) frente a un electrodo de referencia o midiendo la resistencia de polarización para calcular la velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ). El electrodo de referencia empleado es de calomelano y la resistencia de polarización se mide según la norma UNE 112072 [33].

Para realizar la medida, se desconecta la fuente de potencial, y se mide realizando dos medidas una tras la espera de 15 minutos y otra tras unas 4 horas, con el objeto de que se estabilice el potencial. Para esta medida el electrodo de referencia se coloca introducido en la disolución salina o en la cara superior de la probeta en la zona no cubierta por el electrodo y se mide la diferencia de potencial con un voltímetro entre el electrodo y la barra.

La corrosión se detecta cuando el potencial es igual o inferior a 300 mV respecto del electrodo de referencia. El ensayo se da por terminado cuando se ha medido dos veces seguidas con una separación de 2 a 4 horas un potencial más negativo de -300 mV respecto del electrodo de referencia, que se debe limpiar antes de reutilizar.

Al terminar el ensayo, se quitan los electrodos y se vacía el tubo de la disolución. Seguidamente se rompe la probeta por una zona cercana a la barra para observarla y fotografiarla, comprobando la corrosión que se ha producido. En una de las mitades se rocía con nitrato de plata, para comprobar que los cloruros han llegado a la armadura.

El dato del contenido de los cloruros totales se evalúa a partir de 2 a 3 gramos de muestra de hormigón de una zona adyacente a la barra de donde se ha detectado la corrosión.

La medida de velocidad de corrosión de la barra en el periodo de propagación de la corrosión se debe caracterizar de forma adicional al coeficiente de difusión y del límite de cloruros, mediante una probeta gemela, la resistencia de polarización ( $R_p$ ) de la barra y a partir de este valor la velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ), según la UNE 112072 [33]. El ensayo se puede desarrollar de dos modos:

- Estudio de evolución de la corrosión en condiciones naturales: durante al menos 28 días después de la desconexión de la probeta, se mide la velocidad de corrosión diariamente.
- Estudio de corrosión completa de la barra: la probeta sigue en condiciones aceleradas (mismo voltaje durante todo el ensayo) hasta que se comprueba la estabilización de la velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ). La velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ) estabilizada es cuando la ( $I_{corr}$ ) varía menos del doble o la mitad de la última medida, esta condición de estabilizada corresponde a la corrosión completa de toda la barra ( $I_{corr, completa}$ ).

A continuación, se resumen los cálculos que hay que realizar. Para el cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación de la armadura se tiene que:

$$R_e_{inicial} = \frac{V}{I_{inicial}} \quad (3.24)$$

$$R_e_{despasivación} = \frac{V}{I_{despasivación}} \quad (3.25)$$

donde

- $R_e$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega$ ).
- $V$  es el potencial aplicado (V).
- $I_{inicial}$  es la corriente que circula por la probeta a (5-15) min (A).
- $I_{despasivación}$  es la corriente que circula por la probeta justo antes de la finalización del ensayo (A).

Para el cálculo del coeficiente de difusión en estado no estacionario (aparente) recurrimos a las expresiones (3.22) y (3.23).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Para el cálculo de la corrosión acumulada o penetración de la corrosión  $P_{corr}$  recurrimos a las siguientes expresiones

- a) El estudio de la evolución de la corrosión en condiciones naturales:

$$P_{corr} = 0,00116 \cdot l_{corr,media} \cdot t \quad (3.26)$$

- b) El estudio de la corrosión completa de la barra:

$$P_{corr} = 0,00116 \cdot l_{corr,completa} \cdot t \quad (3.27)$$

donde:

- $P_{corr}$  es la penetración homogénea equivalente de la corrosión o perdida de radio de la barra (cm).
- 0,0116 es la constante que transforma  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  en cm.
- $l_{corr,media}$  es la media de las velocidades de corrosión medidas durante el periodo de propagación de la corrosión en condiciones naturales, mediante la medida de la  $R_p$  (A).
- $l_{corr,completa}$  es la velocidad de corrosión estabilizada durante el periodo de propagación en condiciones aceleradas, mediante la medida de la  $R_p$  (A).
- $t$  es el periodo de tiempo de propagación de la corrosión (al menos 28 días) en años.

#### 3.2.10.4. Método Integral acelerado modificado.

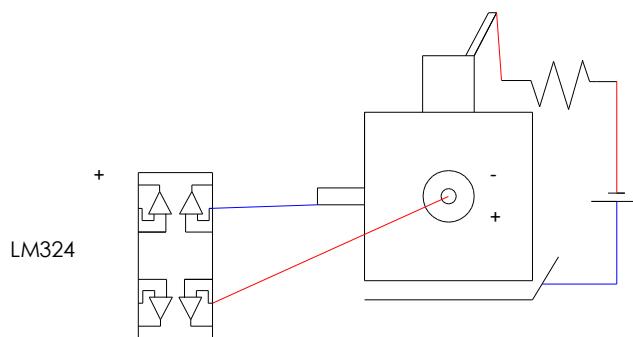
Además de realizar el montaje, tal y como se contempla en la norma UNE 83992-2 [32], se ha llevado a cabo, paralelamente, una propuesta alternativa a la dispuesta anteriormente.

Dicha propuesta sólo plantea unos pequeños cambios que, si bien no afectan al desarrollo químico del ensayo, sí que podrían afectar a la adquisición de los datos necesarios para la correcta interpretación del mismo.

Así, mientras que en la norma se propone la utilización de un electrodo de referencia (ya sea de calomelanos, de Ag/AgCl, etc.) para la toma de los potenciales en la barra embebida, en nuestro caso se propone la incorporación de un electrodo anexado al plano perpendicular a la que se encuentra la barra embebida, que como se puede observar en la figura 3.42, se trata de la pared que quedaría libre en el ensayo.

De esta forma, para la medida de un potencial referenciado, se conecta el polo negativo del voltímetro al acero embebido y el polo positivo al electrodo pegado al hormigón. De esta forma tendríamos una medida sin fluctuaciones ya que tenemos siempre la referencia del electrodo externo.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.42.-** Esquema de conexiones del sistema implementado.

Por otro lado, tal y como ya se ha comentado, se realizan ambos montajes paralelamente y con el mismo potencial de alimentación, por lo que cabría esperar que los resultados fueran similares.

Efectivamente, los resultados fueron similares, aunque en la propuesta de montaje realizado se observó una pequeña incidencia. A la hora de tomar la medida se producía una caída de tensión tras la conexión del multímetro a la muestra.

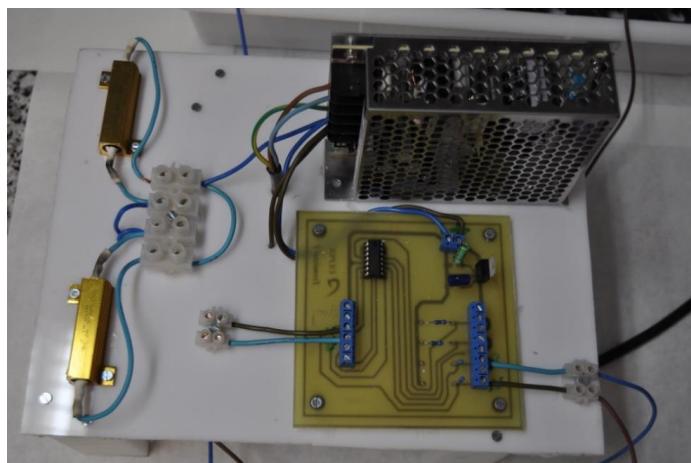
Para solucionar este problema, teniendo en cuenta que los valores obtenidos en el momento de la conexión y justo antes de que se produjera la mencionada caída de tensión, eran idénticos a los observados con el montaje propuesto en la norma, se procedió al montaje de un circuito que permitiera la estabilización de la señal, sin que afectara a ésta.

El montaje, que consta básicamente de un elemento de control, alimentado por una fuente externa de alimentación en corriente continua, permitió obtener una medida en cada momento de datos sin el inconveniente de las fluctuaciones anteriormente observadas.

Como se puede observar en la figura 3.42 el elemento de control es un operacional modelo LM324 que, alimentado por 5 V, nos suministra una lectura estable. Además, se ha hecho uso de una resistencia de  $0,1\ \Omega$  en serie con la fuente de potencial, para poder medir la intensidad de corriente que entra en cada probeta, sin necesidad de desconectar el circuito. Siguiendo la ley de Ohm, podemos calcular la intensidad de corriente circulante por un objeto de resistencia conocida si conocemos el potencial que atraviesa el mismo.

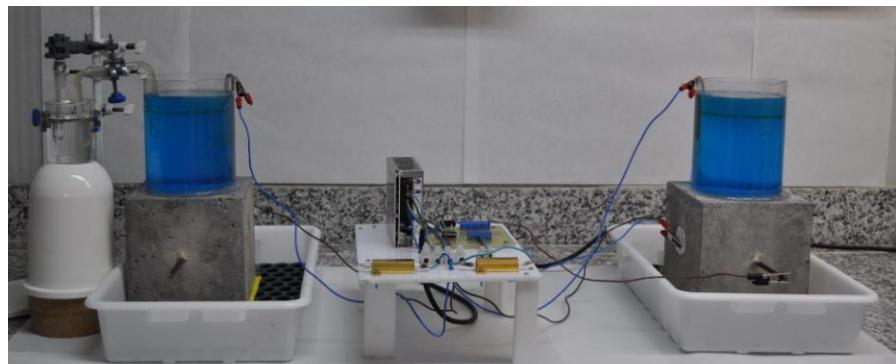
En la imagen siguiente, (figura 3.43) se muestra el montaje realizado que responde al esquema anterior.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 3.43.-** Montaje de fuente de tensión y sistema de adquisición de datos.

El montaje final tiene el aspecto mostrado en la figura 3.44, donde se puede observar dos sistemas montados en paralelo.



**Figura 3.44.-** Montaje final dos sistemas en paralelo.

### 3.3. Referencias.

- [1] Hormigón. Manuel Fernández Cánovas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 2002.
- [2] L.E. Hernández Gutiérrez, Caracterización Geomecánica de las Rocas Volcánicas de las Islas Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2004.

- [3] AIDICO. Catálogo de explotaciones de áridos para la construcción de la Comunidad de Valencia. 2011.
- [4] CEDEX. Ficha técnica. Humo de sílice. Madrid. Diciembre 2007.
- [5] ASTM Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete. C311-77.
- [6] AENOR. Cementos con características adicionales. Parte 2: Cementos resistentes al agua de mar. UNE 80303-2. AENOR, Madrid, 2011.
- [7] AENOR. Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos. UNE EN 196-5. AENOR, Madrid, 2011.
- [8] AENOR. Ensayos de cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. UNE-EN 197-1. AENOR, Madrid, 2011.
- [9] AENOR. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. UNE-EN 196-1. AENOR, Madrid, 2005.
- [10] AENOR. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. UNE-EN 1015-11. AENOR, Madrid, 2001.
- [11] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes. UNE-EN 12390-1. AENOR, Madrid, 2001.
- [12] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2. AENOR, Madrid, 2009.
- [13] REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.
- [14] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a la compresión de probetas. UNE-EN 12390-3. AENOR, Madrid, 2009.
- [15] AENOR. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: ensayo de asentamiento, (mediante el cono de Abrams) según la norma UNE-EN 12350-2. AENOR, Madrid, 2009.
- [16] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad de hormigón endurecido. UNE-EN 12390-7. AENOR, Madrid, 2009.
- [17] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo. UNE 83988-1. AENOR, Madrid, 2008.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### Capítulo 3

---

- [18] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. UNE 83988-2:2008. AENOR, Madrid, 2008.
- [19] AENOR. Ensayos de hormigón. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión (Anulada). UNE 83309-90 EX. AENOR, Madrid, 1990.
- [20] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8. Profundidad de penetración de agua baja presión. UNE EN 12390-8:2001. AENOR, Madrid, 2001.
- [21] ASTM. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM D4404 – 84 (Reapproved 1998). ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.
- [22] AENOR. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. UNE EN 1936. AENOR, Madrid, 2007.
- [23] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. UNE 83980. AENOR, Madrid, 2014.
- [24] AENOR. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:1994. AENOR, Madrid, 1994.
- [25] AENOR. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:2011. AENOR, Madrid, 2011.
- [26] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural. UNE 83993-1. AENOR, Madrid, 2013.
- [27] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 2: Método acelerado. UNE 83993-2. AENOR, Madrid, 2013.
- [28] AENOR. Ensayo de durabilidad del hormigón. Determinación de la difusión de iones cloruro. PrNE 83986:2009. AENOR, Madrid, 1ª versión marzo, 2009.
- [29] CEN. Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. CEN/TS 12390-11:2010. Austrian Standards plus GmbH, Viena, 2010.

---

116

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- [30] AENOR. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido. UNE-EN 14629:2007. AENOR, Madrid, 2007.
- [31] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de los coeficientes de difusión de iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirregimen. UNE 83987. AENOR, Madrid, 2014.
- [32] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayo de penetración de cloruros en el hormigón. Método integral acelerado. UNE 83992-2. AENOR, Madrid, 2012.
- [33] AENOR. Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia de polarización. UNE 112072. AENOR, Madrid, 2011.
- [34] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo. UNE-EN 12390-4:2001. AENOR, Madrid, 2001.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 3

---

---

118

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

# Capítulo 4

Caracterización de la porosidad  
y su relación con otras variables  
características de materiales de  
naturaleza cementosa

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE NATURALEZA CEMENTOSA.**

### **ÍNDICE**

<b>4. CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE NATURALEZA CEMENTOSA .....</b>	<b>121</b>
<b>    4.1. Introducción .....</b>	<b>121</b>
<b>    4.2. Muestras, ensayos de porosidad realizados y resultados obtenidos.....</b>	<b>121</b>
4.2.1. Ensayos de porosidad por intrusión de mercurio .....	122
4.2.2. Ensayos de porosidad accesible .....	123
<b>    4.3. Discusión de los resultados .....</b>	<b>125</b>
4.3.1. Porosidad por medidas de intrusión de mercurio (MIP) .....	125
4.3.2. Ensayo por intrusión de mercurio (MIP) vs porosidad accesible ....	129
4.3.3. Relación entre porosidad y resistencia características de los hormigones .....	133
<b>    4.4. Durabilidad de los hormigones .....</b>	<b>138</b>
<b>    4.5. Conclusiones .....</b>	<b>139</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**4.6. Referencias .....140**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 4 – CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE NATURALEZA CEMENTOSA.

### 4.1. Introducción.

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos al caracterizar las porosidades de las distintas muestras ensayadas en la presente tesis empleando dos técnicas distintas como son el método de porosidad accesible al agua y el método de porosidad por intrusión de mercurio. Ambos métodos experimentales se encuentran descritos en el capítulo 3.

Mediante la técnica de porosidad por intrusión de mercurio (MIP) se caracteriza la distribución y geometría del poro, teniendo en cuenta factores de corrección del ángulo de fase y tensión superficial del mercurio. A partir de esta caracterización se establece una relación entre las porosidades obtenidas por MIP y las obtenidas por el método de accesibilidad al agua, técnica menos compleja y nociva, así como la durabilidad de las muestras frente a procesos adversos de congelación/descongelación.

Por último, se establece una relación entre ésta y la resistencia a la compresión a 28 días tanto para muestras de pasta de cemento como de hormigones.

### 4.2. Muestras, ensayos de porosidad realizados y resultados obtenidos.

Los materiales ensayados abarcan un total de 43 muestras, que se distribuyen entre seis pastas de los diversos tipos de cementos, un árido y una variedad de 36 hormigones de obra que van desde HM-20 a HA-50.

Los ensayos que en el presente capítulo se relacionan y comparan resultados, son:

- Método de determinación de porosidad accesible al agua, según la UNE 83980-14 [1] para hormigones y la UNE EN 1936 [2] de piedra natural.
- Método de porosidad por intrusión de mercurio ASTM D4404 [3], tanto para el árido, la pasta de cemento como para hormigones.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

#### 4.2.1. Ensayos de porosidad por intrusión de mercurio.

El anexo III contiene las gráficas con los resultados obtenidos al analizar las distintas muestras, codificados según se ha descrito en el apartado 3.1.1, y que se resumen a continuación:

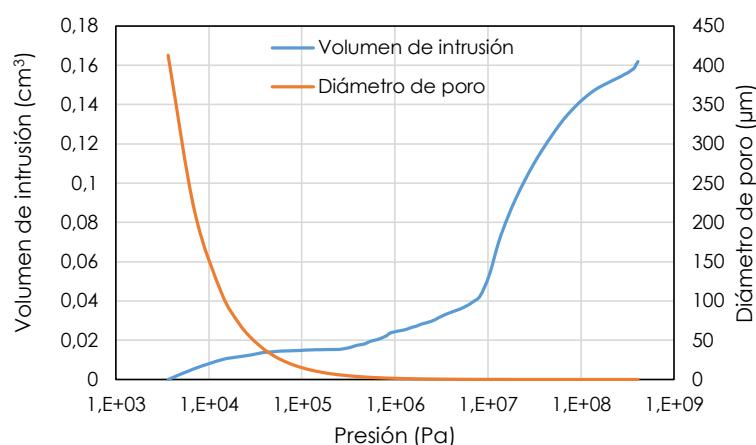
- Una muestra de árido basáltico típico (A1).
- Seis muestras de pastas de varios tipos de cemento (C1 a C6).
- Treinta y siete muestras de hormigones, de distintas resistencias y características (H1 a H36).

Mediante esta técnica se han obtenido los siguientes resultados:

- Porosidad total de la muestra, en un rango de diámetro de poro comprendido entre  $420 \mu\text{m}$  y  $3,5 \text{ nm}$ .
- Porcentaje de porosidad acumulada en función del diámetro de poro.
- Volumen de intrusión de mercurio en función de la presión aplicada.
- Variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada.

Dado el volumen de gráficas resultantes, en este capítulo sólo se expondrán los resultados, mostrándose únicamente varias gráficas tipo que ayuden en la discusión de los resultados.

De un análisis de los resultados obtenidos y mostrados en el anexo III, se observa que el perfil de variación del volumen de intrusión de mercurio, así como el diámetro de poro es similar para todas las muestras analizadas, tanto para muestras de hormigón como para muestras de pasta de cemento (figura 4.1)

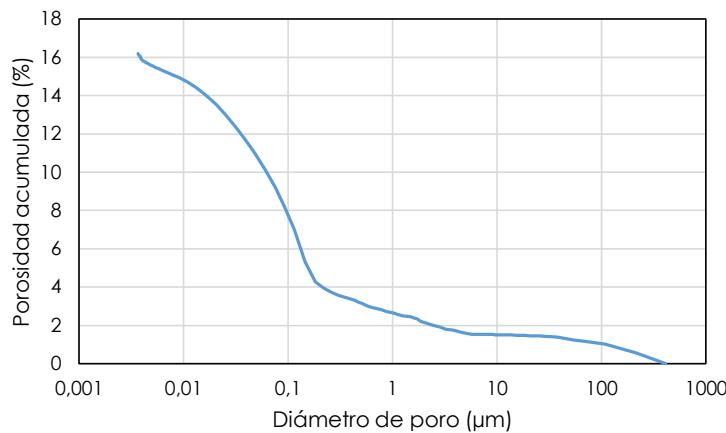


**Figura 4.1.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra de hormigón H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

La variación tanto del volumen de intrusión de mercurio como del diámetro de poro sigue la tendencia normal en este tipo de ensayos. Así, al aumentar la presión aplicada aumenta el volumen de mercurio que ingresa en la muestra al mismo tiempo que se accede a poros de tamaño más pequeño. En todos los casos analizados, el menor diámetro de poro detectado fue de 3,6 nm, mientras que el mayor tamaño de poro parte de 412  $\mu\text{m}$ .

A partir de la variación en el volumen de intrusión de mercurio normalizado se ha obtenido tanto la porosidad total de la muestra como la fracción de porosidad acumulada en función del diámetro de poro. En la figura 4.2 se muestra dicha variación para la muestra de hormigón H18, que presenta un perfil similar al presentado por todas las muestras. La mayor porosidad obtenida a partir de esta gráfica se corresponde con la mayor presión aplicada y el menor diámetro de poro, siendo una estimación de la porosidad total de la muestra [4].



**Figura 4.2.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

A partir de estos resultados se obtiene la porosidad total de la muestra, recogida en detalle en la tabla 4.1.

#### 4.2.2. Ensayos de porosidad accesible.

Al mismo conjunto de muestras se le determinó la porosidad empleando las técnicas de porosidad accesible y porosidad de piedra natural, cuyos resultados se recogen en la tabla 4.1.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 4.1.-** Resultados de muestras ensayadas a resistencia, densidad seca, porosidad accesible al agua y porosidad por intrusión de mercurio.

Código de muestra	Tipo de hormigón	Resistencia a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	Densidad aparente (kg/cm <sup>3</sup> )	Porosidad accesible (%)	Porosidad por intrusión de mercurio (%)
A1	Árido-típico canario	---	2660	8,00	18,80
C1	Pasta de cto.	74,10	1570	37,89	26,44
C2	Pasta de cto.	53,70	1750	29,45	17,25
C3	Pasta de cto.	65,00	1590	34,31	20,62
C4	Pasta de cto.	74,10	1710	27,30	16,57
C5	Pasta de cto.	53,70	1460	39,83	26,16
C6	Pasta de cto.	65,00	1580	37,86	25,05
H1	HM-20/B/20/I	24,49	2140	25,67	20,95
H2	HM-20/B/20/I	12,18	1960	27,02	22,32
H3	HA-25/B/20/IIa	29,40	2190	19,67	17,37
H4	HA-25/B/20/IIa	29,20	2140	19,00	17,73
H5	HA-25/B/20/IIa	37,27	2200	13,80	11,68
H6	HA-25/B/20/IIa	37,12	2200	20,50	19,26
H7	HA-25/B/20/IIa	44,64	2180	21,50	20,45
H8	HA-25/B/20/IIa	35,61	2200	21,83	18,62
H9	HA-25/B/20/IIa	54,86	2250	16,94	14,01
H10	HA-25/F/12/IIa	34,33	2070	24,50	20,61
H11	HA-25/B/20/IIa	44,84	2220	17,75	17,03
H12	HA-25/B/20/IIa	34,05	2180	20,74	18,57
H13	HA-25/F/12/IIa	40,50	2150	20,50	18,42
H14	HA-25/F/12/IIa	34,50	2240	21,00	19,34
H15	HA-25/B/20/IIa	38,28	2230	21,32	24,88
H16	HA-25/B/20/IIa	42,54	2170	22,31	17,44
H17	HA-25/B/20/IIa	42,50	2230	21,72	15,45
H18	HA-25/F/20/IIIa	48,07	2240	20,21	15,33
H20	HA-25/F/20/IIa	24,81	2150	22,93	20,36
H21	HA-25/B/20/IIa	20,25	2050	26,32	26,33
H22	HA-25/B/20/IIa	24,79	1980	27,71	28,58
H29	HA-30/B/20/IIIa	42,77	2280	14,50	12,31
H30	HA-30/B/20/IIIa	42,70	2170	16,80	17,37
H31	HA-30/B/20/IIIa	39,50	2190	14,33	13,94
H32	HA-30/B/20/IIIa	57,75	2320	15,44	13,71
H33	HA-30/B/20/IIIa	45,75	2270	16,50	16,27
H34	HA-30/B/20/IIIa	58,55	2270	18,04	15,32
H35	HA-30/F/20/IIIc+Qb	43,46	2190	21,20	18,39
H36	HA-30/F/20/IIIc+Qb	35,06	2140	23,57	25,12
H37	HA-30/F/20/IIIa	34,28	2140	22,51	19,09
H38	HA-30/B/20/IIIa	38,99	2220	22,00	16,35
H39	HA-30/F/20/IIIa	24,32	1970	26,00	21,74
H46	HAF-35/P/AC/11/IIa	41,77	2190	17,67	17,36
H47	HAF-35/P/AC/11/IIa	48,63	1870	26,60	22,18
H50	HA-50/F/12/IIa	57,99	2310	13,20	13,13
H51	HA-50/B/20/IIa	51,24	2100	22,83	18,39

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 4.3. Discusión de los resultados.

#### 4.3.1. Porosidad por medidas de intrusión de mercurio (MIP).

Los datos de porosidad obtenidos con la técnica de intrusión de mercurio se han obtenido a partir de las curvas de volumen de poro acumulado vs diámetro de poro. De un análisis de las curvas mostradas en el anexo III se desprende que todos los datos obtenidos son coherentes al obtenerse un aumento en la porosidad acumulada a medida que disminuye el tamaño de poro. Este resultado es el esperado ya que el mercurio no puede salir de la muestra a medida que se incrementa la presión aplicada. No obstante, algunas comprobaciones y ajustes se han efectuado con los datos obtenidos a partir del equipo de porosimetría de mercurio comercial.

En esta técnica, está bien establecido que para obtener el valor de diámetro de poro se recurre a la conocida expresión de Washburn

$$d = \frac{-4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{P} \quad (4.1)$$

donde:

- $d$  es el diámetro equivalente de los poros ( $\mu\text{m}$ ).
- $\gamma$  es la tensión superficial del mercurio ( $\text{N/m}$ ).
- $\theta$  es el ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes del poro.
- $P$  es la presión a la que el mercurio es introducido en el poro ( $\text{MPa}$ ).

En nuestro caso, la presión ejercida osciló entre  $3,6 \cdot 10^{-3}$  y  $4,098 \cdot 10^8 \text{ MPa}$ , lo que permitió caracterizar poros desde  $3,6 \text{ nm}$  a  $412 \mu\text{m}$ . Los datos de tensión superficial y ángulo de contacto aplicados fueron de  $0,484 \text{ N/m}$  y de  $141^\circ$  respectivamente, que son muy cercanos a los indicados en la bibliografía. No obstante, la ecuación (4.1) no recoge los cambios de tensión superficial a medida que cambia el diámetro del poro. Es decir, se considera que  $\gamma$  permanece constante durante todo el ensayo, lo cual es incorrecto. A medida que el radio de curvatura del menisco de mercurio disminuye desde el infinito, su tensión superficial decrece. Si  $\gamma_\infty$  es la tensión superficial de una superficie de mercurio plana, a medida que la vamos curvando la tensión superficial varía de la siguiente manera:

$$\gamma = \left( \frac{\gamma_\infty}{1 + 2b_r/R_r} \right) \quad (4.2)$$

donde:

- $b_r$  es el radio efectivo de un átomo de mercurio (aproximadamente  $270 \text{ pm}$ ).
- $R_r$  es el radio de curvatura del menisco.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

A partir de la ecuación (4.2), es evidente que para que este término tenga significancia  $R$  tiene que ser de un orden de magnitud similar al de  $b$ . Dado que generalmente  $R$  suele adoptar valores relativamente grandes, se puede emplear  $\gamma_\infty$  dentro de los valores indicados en la bibliografía sin cometer mucho error. No obstante, y dado que se conoce la relación entre  $R$  y el ángulo de contacto,  $\theta$ ,

$$R_r = \frac{d}{-2\cos\theta} \quad (4.3)$$

se puede obtener, de forma casi inmediata, la siguiente ecuación generalizada de Washburn,

$$d_r = \frac{-\phi \cdot \gamma_\infty \cdot \cos\theta}{P} + 4 \cdot b_r \cdot \cos\theta \quad (4.4)$$

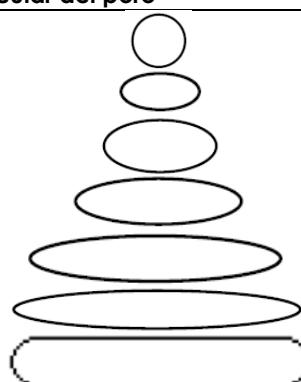
donde:

- $\phi$  es el factor de forma del poro. Dicho valor puede variar desde 2 a 4, tal y como se indica en la tabla 4.2.

Con esta modificación se consiguen correcciones de hasta el 30% para presiones inferiores a 100 MPa.

**Tabla 4.2.- Factores de forma empleados en la ecuación (4.4).**

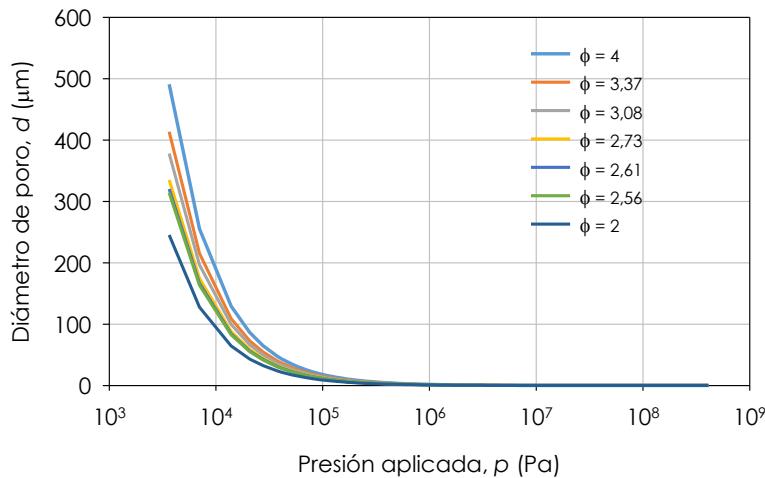
Sección perpendicular del poro	Valor de $\phi$
Circular	4,00
1,5:1 Elíptica	3,37
2:1 Elíptica	3,08
4:1 Elíptica	2,73
8:1 Elíptica	2,61
16:1 Elíptica	2,56
Abertura (paredes paralelas)	2,00



La ecuación (4.1) se aplica considerando un factor de forma de 4, es decir, considerando la sección del poro circular en todo momento, lo cual no se ajusta a la realidad. En este caso, el significado de  $d$  de la ecuación (4.4) pasa de ser el diámetro equivalente del poro a ser la dimensión más estrecha del mismo. El resto de las variables de la ecuación (4.4) adoptan el mismo significado que en la formulación original de la ecuación (4.1).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

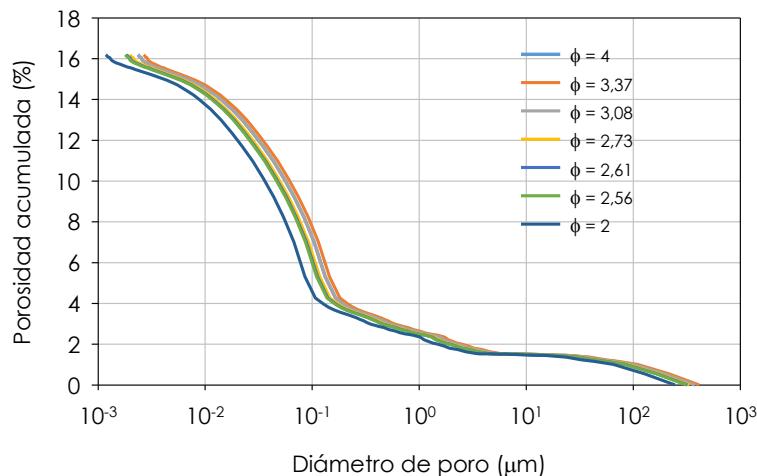
La cuestión que se plantea ahora es qué valor de  $\phi$  adoptar. En nuestro caso se ha procedido a evaluar los valores de porosidad y diámetro de poro considerando todas las geometrías posibles. En la figura 4.3 se muestra el efecto que tiene la sección de poro considerada en el diámetro de poro obtenido. En el anexo III se muestran todas las gráficas obtenidas, que no son mostradas aquí por su elevado número.



**Figura 4.3.-** Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Se observa que a medida que disminuye el factor de forma lo hace el valor de  $d$ , llegando a adquirir valores casi un 50% menores respecto a la consideración de poro con sección circular. Esto implica una variación considerable en la tensión superficial del mercurio a lo largo del experimento, dado lo tortuoso de los poros existentes tanto en un cemento como en un hormigón. También presenta un efecto en la distribución de tamaños de poros en función del volumen de mercurio introducido para una presión de trabajo determinada. Así, para valores de  $\phi$  bajos se ha de recurrir a mayores presiones para obtener una misma porosidad acumulada de la muestra, tal y como se muestra en la figura 4.4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 4.4.-** Efecto del tipo de factor de forma del poro en la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

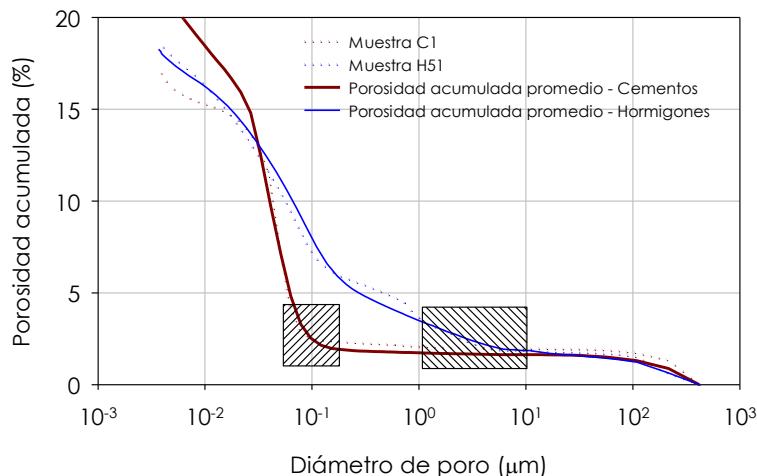
Estos resultados han sido observados en la totalidad de las muestras analizadas, tal y como se puede observar en las gráficas mostradas en el anexo III. De esos datos, se ha obtenido que para las muestras ensayadas en la presente tesis, el factor de forma que mejor se ajusta a los resultados experimentales es de  $\phi = 3,37$ , es decir, considerar poros de geometría elíptica 1,5:1. A partir de diámetros pequeños, del orden de 10 nm e inferiores, el valor que mejor se ajusta es el factor de forma 4.

Se observa que las muestras de pasta de cemento presentan porosidades, determinadas por MIP, superiores a las obtenidas para los hormigones. Así, el rango de porosidad encontrado para las muestras de pasta de cemento oscila entre el 27,30% (muestra C4) y 39,83% para la pasta C5. Esto implica que todas las probetas de pasta de cemento presentan una elevada porosidad ( $> 15\%$ ). La porosidad de las muestras de hormigón oscila en un abanico mucho más amplio. La menor porosidad se da para la muestra H5 (11,68%) y la máxima para la muestra H22 (28,58%). En todos los casos, la mayor aportación a la porosidad está concentrada en los poros de pequeño diámetro. En la figura 4.5 se muestran dos gráficas tipo para ejemplificar la discusión, así como la variación promedio para todas las muestras de cemento y hormigón analizadas.

En el caso de las muestras de pasta de cemento, se observa una clara variación en la tendencia de porosidad acumulada en torno a los poros de  $0,1 \mu\text{m}$  de diámetro y valores inferiores (zona sombreada en la figura 4.5). La primera aportación a la porosidad acumulada aparece a partir de poros de unas pocas centenas de micras y permanece invariable hasta que se alcanzan valores cercanos

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

a  $0,1 \mu\text{m}$ . A partir de ese valor límite, la porosidad acumulada aumenta de forma exponencial hasta su valor final. El valor final exhibido en la gráfica se corresponde con la porosidad total de la muestra.



**Figura 4.5.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para las muestras C1 y H51 así como para los valores promedio de todas las muestras de cemento y de hormigón analizadas. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Esta variación en la porosidad acumulada indica que dichas pastas de cemento presentan muchos poros de pequeño diámetro que aportan la casi totalidad de la porosidad de la muestra. Sin embargo, en las muestras de hormigón se observa una tendencia distinta. La porosidad acumulada aumenta a valores de diámetro de poro superiores (entre 1 y  $10 \mu\text{m}$ , figura 4.5), aportando casi un 40% de la porosidad acumulada total para el intervalo de diámetros que abarca desde el mayor de ellos hasta  $0,1 \mu\text{m}$ . Esto indica que las muestras de hormigones presentan una estructura de poros menos homogénea en cuanto a su distribución de tamaños de poro en comparación con las pastas de cemento.

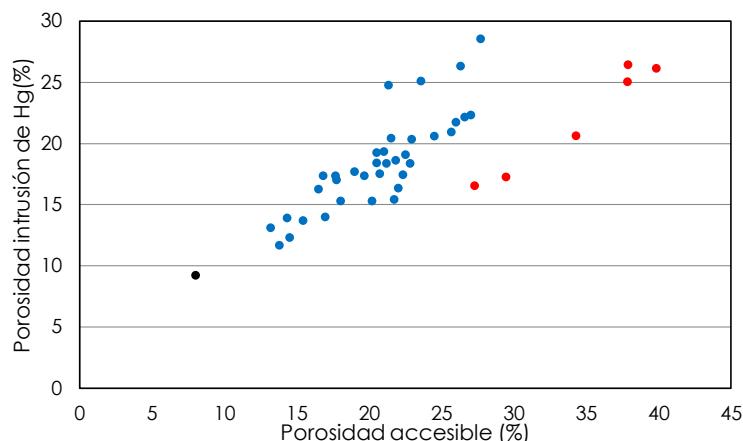
#### 4.3.2. Ensayo por intrusión de mercurio (MIP) vs porosidad accesible.

Aunque *a priori* el ensayo MIP nos aporta mucha información sobre la porosidad, tamaño y distribución de los poros, se trata de un ensayo complejo de realización e interpretación. Además, no debemos olvidar el uso de un elemento tan contaminante como es el mercurio, por lo que plantear un ensayo relativamente sencillo que sea capaz de correlacionarse con MIP y extrapolar sus resultados sería un gran hallazgo. En el siguiente apartado se establece una relación entre los resultados

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

obtenidos por la técnica MIP y los obtenidos por la técnica de porosidad accesible al agua.

El ensayo de porosidad accesible es no destructivo, una característica importante que permite una repetición del ensayo sobre la misma muestra o poder emplear la probeta para la realización de otro ensayo o determinar otra propiedad. Por ello, paralelamente a la determinación de la porosidad por la técnica MIP, ésta se determinó empleando la técnica de porosidad accesible al agua. En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos. En la figura 4.6 se representa la relación existente entre ambas porosidades para el conjunto de muestras analizadas.

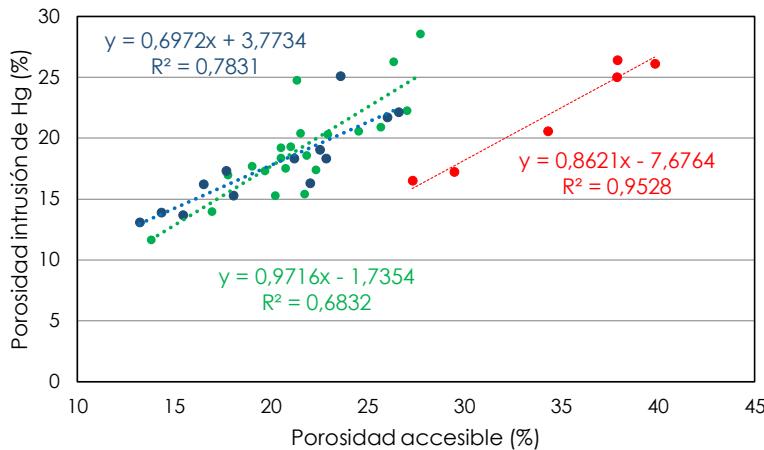


**Figura 4.6.-** Comparativa entre porosidades de todas las muestras. (● árido; ● pasta de cementos y ● hormigones).

Para una mejor discusión de los resultados obtenidos, se va a subdividir las muestras en función de su naturaleza y resistencia característica, tal y como se muestra en la figura 4.7. Se tienen 6 muestras de pasta de cemento y dos grupos de datos agrupados por similitud de resistencia característica correspondientes a las 36 muestras de hormigones. Así un grupo está formado por diecinueve muestras de hormigones HA-25 y dos HM-20, mientras que un segundo grupo de hormigones agrupa once muestras de hormigones HA-30, dos muestras HA-35 y dos HA-50.

A partir de los datos mostrados tanto en la tabla 4.1 como en la gráfica anterior, para la pasta de cemento se verifica que la porosidad obtenida por accesibilidad por agua es superior a la porosidad por intrusión de mercurio en todos los casos estudiados, siendo ésta superior entre un 43% a un 71% aproximadamente (de 1,43 a 1,71 veces mayor). Sin embargo, se observa una muy buena correlación lineal entre ambas porosidades, tal y como se muestra en la figura 4.7.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 4.7.-** Comparativa entre porosidades de todas las muestras, separadas por su naturaleza (● pasta de cemento; ● HM-20 y HA-25; ● HA-30, HA-35 y HA-50).

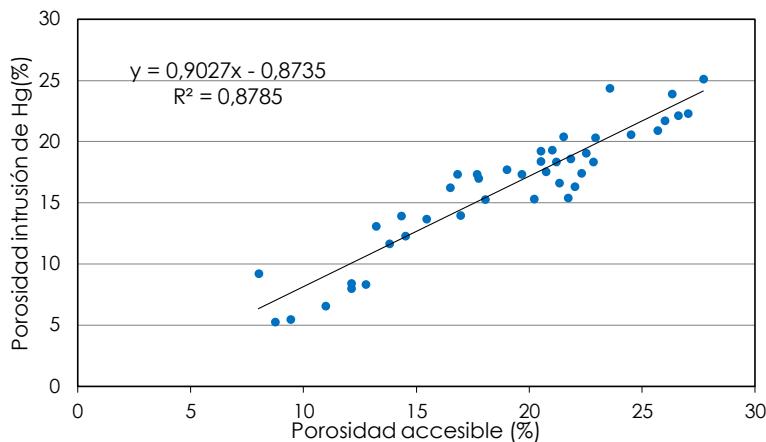
Los dos grupos de hormigones muestran un comportamiento similar al observado para la pasta de cemento, pero no entre ellos. Así, atendiendo a los datos mostrados en la tabla 4.1, y con excepción de los hormigones H15, H21, H22, H30 y H36 donde la porosidad por intrusión de mercurio es superior a la accesible, en el resto de los casos, ésta es inferior, oscilando la diferencia entre un 1% a un 41%. La proporción encontrada entre ambas porosidades oscila entre 0,71 y 1,16, siendo el promedio de 0,9. La porosidad encontrada por este método, para el caso de las muestras de hormigón, nos proporciona valores de porosidad similares a los aportados por la técnica MIP con la ventaja de ser menos compleja. Como desventaja, se pierde información acerca de la distribución de porosidades.

Si tenemos en cuenta que en una masa de hormigón las proporciones medias aproximadas de sus componentes son entre un 30 a un 40% de pasta de cemento y entre un 70 a 60% de áridos, podemos analizar conjuntamente pasta de cemento y hormigón corrigiendo las porosidades de la pasta de cemento en una proporción del 32%, con lo que obtendríamos la gráfica mostrada en la figura 4.8.

En la tabla 4.3 se presentan las ecuaciones resultantes al aplicar regresión lineal entre las medidas de porosidad obtenidas por ambos métodos.

Los resultados obtenidos arrojan buenas correlaciones entre ambos métodos de ensayo agrupando las muestras según su naturaleza, con valores de  $R^2$  entre 0,78 a 0,95, siendo la mejor correlación la obtenida en pastas de cemento. Se observa que, en el caso de las pastas del cemento, más del 95% de la variabilidad en la porosidad por intrusión de mercurio puede ser explicada por la porosidad accesible, mientras que este valor disminuye al 68% y 75% en el caso de los hormigones.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 4.8.-** Comparativa entre porosidades de todas las muestras, separadas por la naturaleza de las muestras, aplicando un factor de corrección a las porosidades de pasta de cemento (● árido; ● pasta de cemento; ● hormigones).

**Tabla 4.3.-** Modelos de correlación de porosidades medidas por intrusión de mercurio y porosidad accesible.

Naturaleza de la muestra	Porosidad Hg(%)=A · Porosidad accesible (%) + B
Pasta de cemento	$y = 0,8621 \cdot x - 7,6764$ ( $R^2 = 0,9528$ )
Hormigones HM-20 y HA-25	$y = 0,9716 \cdot x - 1,7354$ ( $R^2 = 0,6832$ )
Hormigones HA-30 y HA-50	$y = 0,7086 \cdot x + 3,6029$ ( $R^2 = 0,7546$ )
Todas (pasta de cemento correg.)	$y = 0,9072 \cdot x - 0,8735$ ( $R^2 = 0,8785$ )

Al ser corregidas las porosidades de las muestras de pasta de cemento e incluidas con las porosidades de los hormigones, la correlación entre ambos valores de porosidad se ajustan a una línea recta con bastante precisión ( $R^2 \geq 0,88$ ), independientemente de la naturaleza de la muestra.

Los resultados obtenidos implican que los aspectos físicos del ensayo de porosidad accesible al agua, descrito en el capítulo 3, condicionan el resultado de porosidad obtenido. A raíz del fundamento físico del ensayo por intrusión de mercurio, el diámetro de poro detectable llega al entorno de los pocos nanómetros, por lo que la porosidad total de la muestra debe ser superior a la obtenida por otras técnicas, tal y como se describe en la bibliografía [5]. Sin embargo, los resultados obtenidos implican que la cantidad de agua de saturación retenida por las probetas es superior debido a que el agua, a diferencia del mercurio, moja.

Otra variable que involucra el volumen de la muestra es la densidad aparente, la cual nos puede dar una idea del volumen de poro existente. Así, a mayor densidad menos volumen de poro ya que la muestra es más compacta. Si correlacionamos los valores de densidad aparente con porosidad, vemos que para el caso de las pastas de cemento ésta es inferior a la densidad aparente de las probetas de hormigón, presentando un valor promedio de 1610 kg/m<sup>3</sup> para el caso de las pastas de cemento frente a 2170 kg/m<sup>3</sup> de promedio para el caso de las probetas de hormigón. Esta diferencia de densidades es lógica dado que un hormigón está formado por pasta de cemento entre un 30-40% y por árido entre el 60-70%, tal y como se comentó anteriormente. Dado que la densidad del árido es muy superior a la de la pasta de cemento, la densidad aparente del hormigón ha de ser superior.

Si incluimos la densidad aparente como nueva variable al intentar correlacionar los valores de porosidades obtenidas por ambos métodos, planteando una relación múltiple entre porosidad por intrusión de mercurio, como variable dependiente, siendo la porosidad accesible y la densidad seca dos nuevas variables independientes, obtenemos los modelos modificados presentados en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4.-** Modelos de correlación lineal múltiple entre porosidad medidas por intrusión de mercurio con porosidad accesible y densidad seca.

Naturaleza de la muestra	Modelo: Porosidad Hg(%)=A · PA (Porosidad accesible (%)) + B · DA (Densidad Aparente) + C
Pasta de cemento	$y = 0,974 \cdot PA + 5,848 \cdot DA - 20,946$ ( $R^2 = 0,956$ )
Hormigones HM-20 y HA-25	$y = 0,877 \cdot PA - 4,939 \cdot DA + 11,031$ ( $R^2 = 0,686$ )
Hormigones HA-(30, 35 y 50)	$y = 0,635 \cdot PA - 3,570 \cdot DA + 12,821$ ( $R^2 = 0,764$ )

Se observa que, en el caso de las pastas del cemento, más del 95% de la variabilidad en la porosidad por intrusión de mercurio puede ser explicada por la porosidad accesible y la densidad aparente, valor muy cercano al obtenido sólo considerando como variable independiente la porosidad accesible. Lo mismo puede ser observado para el caso de los hormigones. Por tanto, la inclusión de la densidad aparente como variable independiente no mejora la relación entre porosidades.

#### 4.3.3. Relación entre porosidad y resistencia característica de los hormigones.

En la tabla 4.1 se recoge la resistencia característica a 28 días tanto de las pastas de cemento como de los hormigones ensayados.

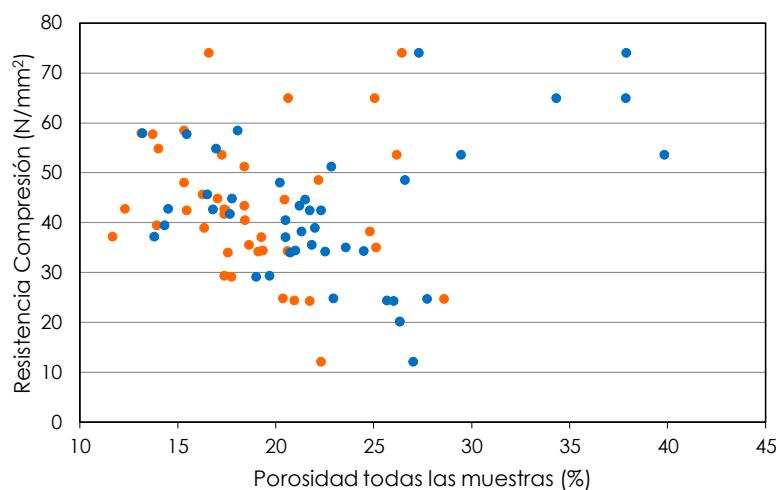
Se observa que los mayores valores de resistencia a la rotura a compresión a 28 días la presentan las muestras de pasta de cemento, con valores que oscilan entre

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

53,70 a 74,10 N/mm<sup>2</sup>. La diferencia encontrada entre las distintas muestras obedece a que el tipo de cemento varía de entre un 32,5 a un 52,5 N/mm<sup>2</sup>.

En cuanto a los hormigones, los valores de resistencia a rotura a compresión a 28 días varían de entre 12,18 N/mm<sup>2</sup> a 58,55 N/mm<sup>2</sup>. Se observa que los hormigones H2, H20 y H21 dan valores de resistencia por debajo de lo esperado según sus especificaciones de albarán de obra. Así, el hormigón H2 presenta un valor de resistencia a la rotura de 12,18 N/mm<sup>2</sup>, muy por debajo de 20 N/mm<sup>2</sup>, su resistencia característica según su identificación, y el H20 y H21 arrojan sendos valores de 24,81 y 20,25 N/mm<sup>2</sup> por debajo de los 25 N/mm<sup>2</sup>.

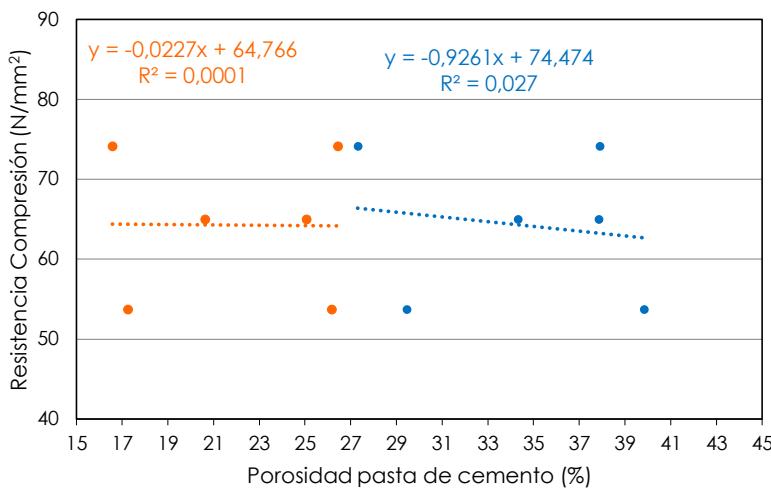
Si atendemos a la relación existente entre la porosidad observada y la resistencia a la rotura a compresión a 28 días, obtenemos los resultados mostrados en la figura 4.9.



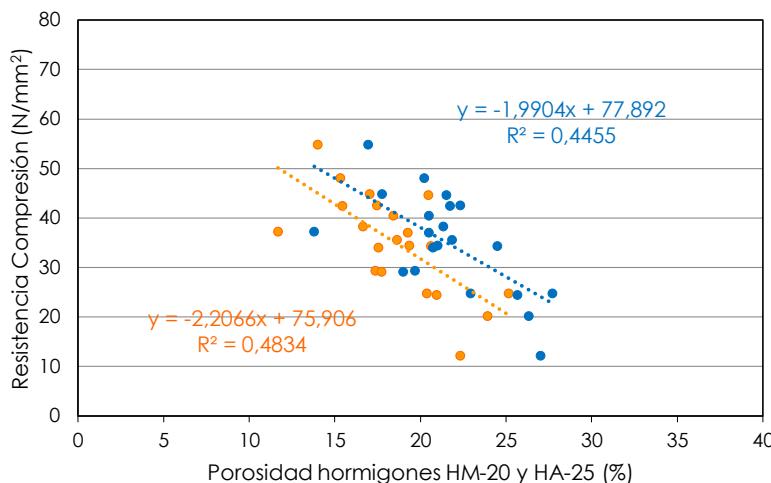
**Figura 4.9.-** Comparativa entre la resistencia a compresión y la porosidad de todas las muestras (● porosidad accesible al agua; ● porosidad por intrusión de mercurio).

La figura 4.9 refleja toda la población de muestras y se observa que a medida que aumenta la porosidad de la muestra disminuye la resistencia a la rotura a compresión de forma general, que es el comportamiento esperado. Las muestras de pasta de cemento son las únicas que no siguen esa tendencia para algunos de los casos analizados.

Si realizamos el mismo análisis atendiendo a la distinta naturaleza de las muestras agrupadas en tres poblaciones, tal y como se indicó en el apartado anterior (pasta de cemento y las treinta y seis muestras de hormigón separadas por su resistencia característica), obtenemos las gráficas de las figuras 4.10 a 4.12.

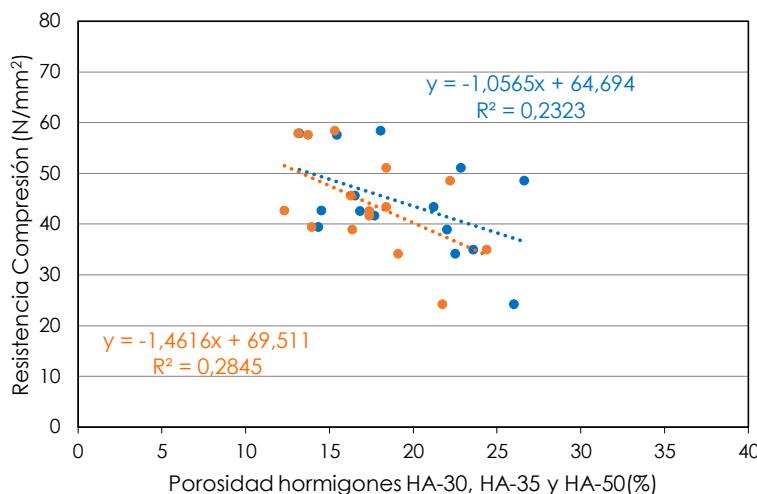


**Figura 4.10.-** Comparativa entre la resistencia a compresión y la porosidad de las muestras de pasta de cemento (● porosidad accesible al agua; ● porosidad por intrusión de mercurio).



**Figura 4.11.-** Comparativa entre la resistencia a compresión y la porosidad de las muestras de hormigón de resistencia característica HM-20 y HA-25 (● porosidad accesible al agua; ● porosidad por intrusión de mercurio).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

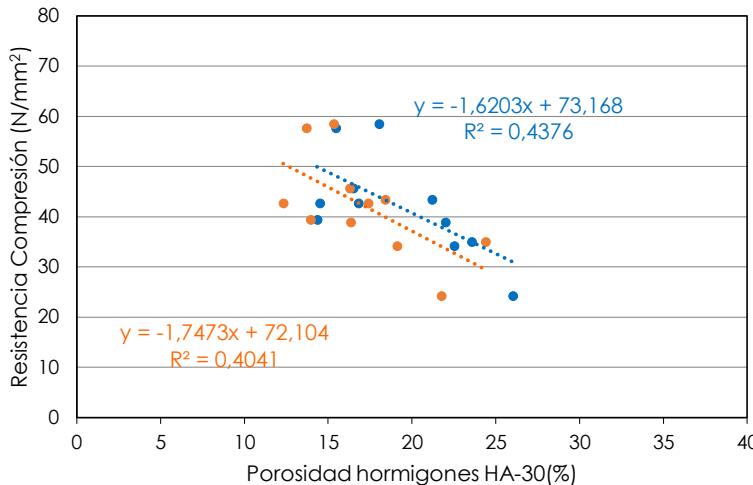


**Figura 4.12-** Comparativa entre la resistencia a compresión y la porosidad de las muestras de hormigón de resistencia característica HA-30 y HA-50 (● porosidad accesible al agua; ● porosidad por intrusión de mercurio).

De la figura 4.10 no se observa una clara dependencia entre la evolución de la resistencia a la compresión y la porosidad para las muestras de pasta de cemento.

En el caso de los hormigones, se observa una buena relación lineal entre resistencia característica y porosidad para los hormigones HM-20 y HA-25, manteniéndose la misma tendencia que la observada para todo el grupo muestral. Sin embargo, la segunda agrupación que abarca hormigones HA-30, HA-35 y HA-50, muestra una peor correlación entre ambas variables, independientemente del método de determinación de la porosidad. En este grupo, si sepáramos los hormigones HA-30 (figura 4.13), se observa que estos sí que presentan la misma tendencia que la mostrada para la agrupación anterior (hormigones HM-20 y HA-25). La dispersión observada podría ser debida a que el HA-35 es autocompactante y a que el HA50 contiene un árido 12 mm, obteniéndose una diferencia mínima entre las porosidades independientemente del método empleado.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 4.13.-** Comparativa entre la resistencia a compresión y la porosidad de las muestras de hormigón de resistencia característica HA-30 (● porosidad accesible y ● porosidad intrusión de mercurio).

Las tendencias observadas entre resistencia a la compresión y porosidad son independientes del tipo de técnica empleada a la hora de determinar la porosidad. Al igual que en el apartado anterior, se plantea el incluir la densidad aparente como variable independiente para ver si mejora el ajuste, dado que es una variable que lleva implícita la porosidad. En la tabla 4.5 se muestran los modelos obtenidos.

**Tabla 4.5.-** Modelos de correlación lineal múltiple entre porosidad medidas por intrusión de mercurio con porosidad accesible y densidad seca.

Naturaleza de la muestra	Modelo: Resistencia = A · P (Porosidad (%)) + B · DA (Densidad Aparente) + C	
	Porosidad accesible (PA)	Porosidad por intrusión de mercurio (PHg)
Pasta de cemento	$y = -0,464 \cdot PA - 8,775 \cdot DA + 94,383$ ( $R^2 = 0,028$ )	
Hormigones HM-20 y HA-25	$y = -0,538 \cdot PA + 78,882 \cdot DA - 12 - 123,733$ ( $R^2 = 0,617$ )	
Hormigones HA-30	$y = 0,040 \cdot PA + 90,936 \cdot DA - 158,395$ ( $R^2 = 0,759$ )	
		Porosidad por intrusión de mercurio (PHg)
Pasta de cemento	$y = 1,021 \cdot PHg + 50,479 \cdot DA - 39,484$ ( $R^2 = 0,074$ )	
Hormigones HM-20 y HA-25	$y = -0,399 \cdot PHg + 82,684 \cdot DA - 136,001$ ( $R^2 = 0,617$ )	
Hormigones HA-30	$y = 0,092 \cdot PHg + 92,294 \cdot DA - 162,202$ ( $R^2 = 0,759$ )	

La inclusión de la densidad aparente mejora significativamente el ajuste, proporcionando mejores valores estimados de resistencia a la compresión en función de las porosidades y de la densidad aparente de la muestra.

#### 4.4. Durabilidad de los hormigones.

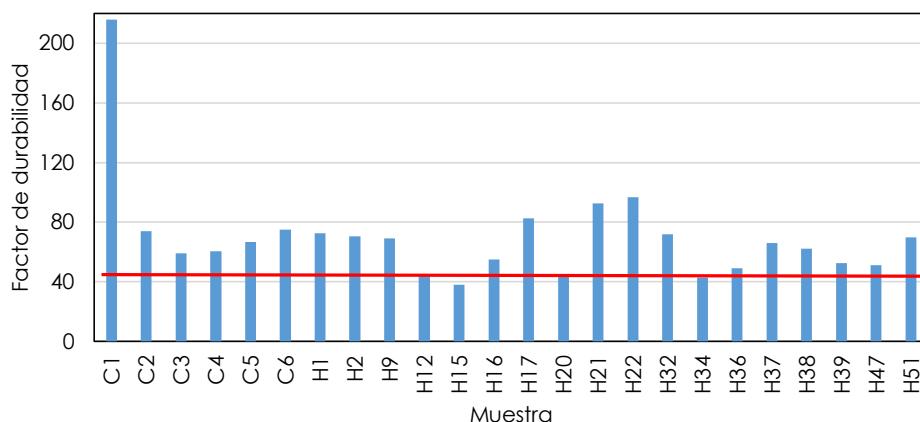
Otro parámetro directamente relacionado con la porosidad de una muestra cementosa es la durabilidad frente a condiciones severas de congelación / descongelación, condiciones que pueden presentarse en cotas altas de la isla de Tenerife. Dicha variable está relacionada con la estructura de los poros del árido. Kaneiji *et al.* [6] desarrollaron un método para cuantificarla que se resume en la ecuación siguiente:

$$EDF = \frac{0,579}{V_{4,5}} + 6,12 \cdot d_m + 3,04 \quad (4.5)$$

donde:

- $EDF$  es el factor de durabilidad del árido que tiene como valor umbral 40. Por debajo de este valor se considera malo.
- $V_{4,5}$  es el volumen total de intrusión de mercurio ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) para un diámetro de poro de 4,5 nm.
- $d_m$  es el tamaño medio de poro ( $\mu\text{m}$ ).

En la figura 4.14 se muestran los factores de durabilidad para un conjunto de muestras analizadas.



**Figura 4.14.-** Factor de durabilidad para el conjunto de muestras de pastas de cemento y hormigones. En rojo se marca el valor umbral por encima del cual deben encontrarse las muestras para ser consideradas aptas.

Se observa que todas las muestras analizadas, a excepción de una (H15), ofrecen valores de durabilidad aceptables.

#### **4.5. Conclusiones.**

A raíz de lo expuesto en los apartados anteriores se concluye lo siguiente:

1. A partir de los datos de porosidad por intrusión de mercurio se obtiene que los poros de las muestras de pasta de cemento y de las muestras de hormigón presentan geometría elíptica 1,5:1 hasta un diámetro de 10 nm. Por debajo de este valor los datos se ajustan a un factor de forma 4 que implica geometría circular.
2. La porosidad de las muestras de pasta de cemento es aportada casi en su totalidad por poros de diámetro inferior a 0,1  $\mu\text{m}$ . La variación de la porosidad acumulada desde diámetros grandes hasta este valor es casi despreciable, aumentando de forma exponencial hasta llegar al valor de porosidad total de la muestra. La estructura porosa de las muestras de pasta de cemento está constituida por poros de pequeño diámetro.
3. La porosidad de las muestras de hormigón está distribuida en poros de mayor diversidad de diámetros. De forma general, un promedio del 40% de la porosidad es aportada por poros de diámetro comprendido entre el valor mayor (sobre 400  $\mu\text{m}$ ) hasta 0,1  $\mu\text{m}$ . Esto indica que las muestras de hormigones presentan una estructura de poros menos homogénea en cuanto a su distribución de tamaños de poro en comparación con las pastas de cemento.
4. Para todas las muestras ensayadas, el factor de forma que mejor se ajusta a los resultados experimentales es de  $\phi = 3,37$ , es decir, considerar poros de geometría elíptica 1,5:1. A partir de diámetros pequeños, del orden de 10 nm e inferiores, el valor que mejor se ajusta es el factor de forma 4.
5. Se ha establecido una correlación entre los resultados de porosidad obtenidos tanto por la técnica de intrusión de mercurio como mediante la técnica de accesibilidad por agua. Las muestras de pasta de cemento y hormigones ensayadas presentan valores de porosidad superiores mediante el ensayo de accesibilidad al agua que por intrusión de mercurio.
6. La relación encontrada entre porosidad por intrusión de mercurio y porosidad por accesibilidad del agua para pastas de cemento es de promedio 0,63, mientras que para hormigones dicha relación es de 0,9.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

7. Existe una buena correlación lineal entre ambas porosidades independientemente de la naturaleza de la muestra cuando se aplica un factor de corrección de volumen a la pasta de cemento con respecto a los hormigones.
8. La resistencia a la compresión de las muestras disminuye a medida que aumenta la porosidad, independientemente del método de cuantificación de ésta.
9. La relación entre la evolución de la resistencia a la compresión con la porosidad se puede ajustar a una línea recta, tanto para la porosidad determinada por MIP como por accesibilidad al agua. La inclusión de la densidad aparente como variable independiente mejora la predicción de la resistencia a la compresión cuando se realiza una regresión lineal múltiple.
10. La estructura interna de los poros tanto de la pasta de cemento como de los hormigones le confieren propiedades que los hace durables frente a condiciones climatológicas de congelación/descongelación.

#### 4.6. Referencias.

- [1] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 14: Ensayo de porosidad, según UNE 83980-14. AENOR, Madrid, 2001.
- [2] AENOR. Ensayos de piedra natural. Ensayo de porosidad accesible, según UNE-EN 1936. AENOR, Madrid, 2007.
- [3] ASTM. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM D4404 – 84 (Reapproved 1998). ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.
- [4] R.A. Cook and K.C. Hover, Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors, *Constr. Build. Mater.* 7 (1993) 231-240.
- [5] V. Cnudde, A. Cwirzen, B. Masschaele, P.J.S. Jacobs, Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes, *Eng. Geol.* 103 (2009) 76–83.
- [6] M. Kaneiji, D.N. Winslow, W.L. Dolch, Relationship between an aggregate's pore size distribution and its freeze-thaw durability in concrete, *Cem. Concr. Res.* 10 (3) (1980) 433-441.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

# **Capítulo 5**

Estudio de la resistividad eléctrica  
de morteros, hormigones de obra  
y hormigones dosificados  
fabricados con materiales de  
Canarias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MORTEROS, HORMIGONES DE OBRA Y HORMIGONES DOSIFICADOS FABRICADOS CON MATERIALES DE CANARIAS.**

### **ÍNDICE**

<b>5. ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MORTEROS, HORMIGONES DE OBRA Y HORMIGONES DOSIFICADOS CON MATERIALES DE CANARIAS .....</b>	<b>143</b>
<b>    5.1. Introducción .....</b>	<b>143</b>
<b>    5.2. Evolución de la resistividad eléctrica de morteros, hormigones de obra y hormigones dosificados con el tiempo .....</b>	<b>144</b>
5.2.1. Evolución de la resistividad eléctrica de las muestras de mortero .....	151
5.2.2. Evolución de la resistividad eléctrica en hormigones de Canarias .....	156
5.2.3. Efecto del tipo de curado en la evolución de la resistividad eléctrica ....	159
5.2.4. Efecto de las dimensiones de las probetas en la evolución de la resistividad eléctrica.....	160
<b>    5.3. Comparativa y validación de la resistividad indirecta medida con el equipo de construcción propia.....</b>	<b>162</b>
<b>    5.4. Comparativa entre las medidas de resistividad directa e indirecta de hormigones de obra y fabricados en laboratorio .....</b>	<b>167</b>
5.4.1. Medida de la resistividad directa por el método modificado de las arandelas o abrazaderas.....	169

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

<b>5.5. Conclusiones .....</b>	<b>171</b>
<b>5.6. Referencias .....</b>	<b>172</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 5 – ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MORTEROS, HORMIGONES DE OBRA Y HORMIGONES DOSIFICADOS FABRICADOS CON MATERIALES DE CANARIAS.

### 5.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al caracterizar la evolución temporal de la resistividad eléctrica directa y de las cuatro puntas o de Wenner (también denominada en adelante como resistividad indirecta), de las muestras de morteros y hormigones, tanto de obra como dosificados en laboratorio. El objeto planteado en este capítulo es el de obtener información sobre el comportamiento evolutivo de la resistividad en distintos materiales de base cementosa como son los morteros y hormigones, los efectos de las adiciones incorporadas a los mismos y otros factores que pueden afectar a la resistividad como su relación con el tamaño y conectividad de los poros.

Ambos métodos de resistividad, así como la codificación e identificación de las muestras, han sido descritos previamente en el capítulo 3, apartado 3.2.6, y en las tablas 3.12 (morteros) y 3.16 (hormigones). Se fabricaron probetas de morteros de dimensiones 10x20 (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) y probetas cilíndricas de hormigones de tamaño 15x30 (15 cm de diámetro y 30 cm de altura) y de 10x20 (10 cm de diámetro y 20 cm de altura), para realizar una comparativa de la resistividad en las dos geometrías. Las probetas se curaron según el procedimiento recogido en la norma UNE-EN 12390-2 [1], consistente en un curado sumergidas en balsa a  $20\pm2^{\circ}\text{C}$  (éste es el curado de referencia y el exigido en las normas para la medida de la resistividad eléctrica). Con la finalidad de comprobar el efecto de los distintos grados de saturación de las probetas alcanzado con los distintos métodos de curado sobre la medida de la resistividad eléctrica, se procedió a comparar probetas curadas según el procedimiento de la norma UNE-EN 12390-2, con probetas gemelas curadas en cámara húmeda, a una temperatura de  $20\pm2^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa  $\text{HR} \geq 95\%$ .

La resistividad eléctrica por el método directo o de referencia, según la norma UNE 83988-1 [2], empleando el dispositivo descrito en el capítulo 3.2.6.1 fue determinada sobre probetas en las que se ha garantizado su completa saturación de agua mediante la inmersión en balsas. En el caso de las medidas de resistividad indirecta por el método de las cuatro puntas o de Wenner, según la norma UNE 83988-2 [2], se han empleado dos dispositivos instrumentales diferentes (descritos en el capítulo 3.2.6.2), uno adquirido a una casa comercial y otro de fabricación propia en el laboratorio. Se ha analizado la relación entre los resultados obtenidos al medir la resistividad indirecta con ambos dispositivos. Ante la no disponibilidad inicial de un equipo de medida comercial, se optó por uno de construcción propia con el que se comenzó a realizar las medidas. De esta forma, se dispone de medidas efectuadas con el equipo propio y con ambos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## 5.2. Evolución temporal de la resistividad eléctrica de morteros, hormigones de obra y hormigones dosificados.

Para el estudio de la evolución de la resistividad eléctrica con el tiempo de curado de las diferentes muestras, se realizaron medidas a una misma probeta a diferentes edades o períodos de tiempo de curado. Los ensayos se realizan garantizando un breve periodo de tiempo desde que se extrae la probeta del lugar de curado hasta la finalización de las medidas, para garantizar que la superficie de la probeta se encuentre en las condiciones óptimas de humectación. Al terminar los ensayos se devuelven inmediatamente a su mismo lugar de curado.

En la tabla 5.1 se plasma el tipo de muestra y la cronología de los tres tipos de ensayos de resistividad eléctrica realizados, así como el número de medidas realizadas en cada muestra.

**Tabla 5.1.-** Cronograma de los ensayos de resistividad eléctrica realizados.

Morteros	Ensayo de resistividad indirecta con equipo de fabricación propia	Ensayo de resistividad indirecta con equipo comercial
Muestras	Rango de Edades de ensayo (nº de medidas)	
M1ANP	3 a 879 días (18)	240 a 879 días (8)
M1ANPZT	2 a 877 días (18)	236 a 877 días (8)
M1ANF	4 a 865 días (18)	239 a 865 días (8)
M1ANHS	4 a 725 días (18)	238 a 725 días (8)
M1ASP	2 a 879 días (18)	240 a 879 días (8)
M1ASPZT	2 a 882 días (18)	240 a 882 días (8)
M1ASF	3 a 884 días (18)	235 a 884 días (8)
M1ASHS	2 a 886 días (18)	239 a 886 días (8)
M2ANP	3 a 877 días (18)	240 a 877 días (8)
M2ANPZT	2 a 877 días (18)	238 a 877 días (8)
M2ANF	4 a 865 días (18)	239 a 865 días (8)
M2ANHS	4 a 888 días (18)	239 a 888 días (8)
M2ASP	2 a 882 días (18)	240 a 882 días (8)
M2ASPZT	2 a 882 días (18)	240 a 882 días (8)
M2ASF	3 a 884 días (18)	235 a 884 días (8)
M2ASHS	2 a 886 días (18)	239 a 886 días (8)

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.1.-** Cronograma de los ensayos de resistividad realizados (continuación).

Hormigón	Ensayo de resistividad indirecta con equipo de fabricación propia	Ensayo de resistividad indirecta con equipo comercial	Ensayo de resistividad directa
Muestras	Rango de Edades de ensayo (nº de medidas)		
H2	2 a 1647 días (23)	1097 a 1647 días (4)	
H18	3 a 1644 días (23)	986 a 1664 días (5)	
H19	3 a 1647 días (24)	951 a 1647 días (5)	--
H20	3 a 1652 días (23)	1099 a 1652 días (4)	--
H23	5 a 1465 días (21)	730 a 1465 días (5)	
H24	3 a 1463 días (22)	728 a 1463 días (5)	
H25		3 a 57 días (6)	
H26		3 a 244 días (11)	3 a 120 días (8)
H27		4 a 222 días (10)	3 a 118 días (8)
H28		4 a 222 días (10)	3 a 118 días (8)
H40	3 a 1284 días (21)	723 a 1284 días (4)	--
H41		3 a 1097 días (19)	379 a 1097 días(5)
H42		14 a 726 días (15)	14 a 90 días (5)
H43		3 a 725 días (18)	3 a 91 días (7)
H44		2 a 362 días (16)	2 a 84 días (7)
H45		4 a 370 días (17)	4 a 90 días (8)
H48		3 a 736 días (18)	3 a 119 días (8)
H49		4 a 371 días (16)	4 a 144 días (9)
H51	2 a 1638 días (22)	939 a 1638 días (5)	--
D1P		5 a 371 días (16)	4 a 90 días (8)
D2P		3 a 244 días (11)	3 a 90 días (8)
D2F		4 a 222 días (10)	4 a 118 días (8)
D2PZT		4 a 215 días (10)	4 a 116 días (8)
D2PV		4 a 215 días (10)	4 a 116 días (8)
D2HS		3 a 157 días (9)	3 a 125 días (8)
D3P		4 a 215 días (10)	4 a 116 días (8)
D3F		2 a 184 días (10)	2 a 126 días (8)
D3PZT		2 a 184 días (10)	2 a 126 días (8)
D3PV		3 a 178 días (10)	3 a 120 días (8)
D3PZC		3 a 178 días (10)	3 a 120 días (8)
D3HS		3 a 157 días (9)	3 a 125 días (8)
D4F		3 a 150 días (9)	3 a 118 días (8)
D4PZT		3 a 148 días (9)	3 a 119 días (8)
D4PV		3 a 150 días (9)	3 a 118 días (8)
D4PZC		3 a 148 días (9)	3 a 119 días (8)
D4HS		3 a 150 días (9)	3 a 118 días (8)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNARICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNAJUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNAERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 5

En las tablas 5.2 a 5.4 se recogen los resultados de las resistividades directa e indirecta, realizadas sobre las muestras de mortero y hormigón. La tabla 5.2 incluye todas las muestras de morteros M1ANP, M1ANPZT, M1ANF, M1ANHS, M1ASP, M1ASPZT, M1ASF, M1ASHS, M2ANP, M2ANPZT, M2ANF, M2ANHS, M2ASP, M2ASPZT, M2ASF y M2ASHS. La tabla 5.3 incluye los hormigones de obra H2, H18, H19, H20, H23, H24, H25, H26, H27, H28, H40, H41, H42, H43, H44, H45, H48, H49 y H51. Por último, en la tabla 5.4 se recogen los resultados de los hormigones dosificados D1P, D2P, D2F, D2PZT, D2PV, D2HS, D3P, D3F, D3PZT, D3PV, D3HS, D3PTC, D4F, D4PZT, D4PV, D4HS y D4PZC.

En todas las tablas anteriores se han identificado las muestras de la siguiente manera: morteros (M), hormigones de obra (H) y hormigones dosificados en laboratorio (D), incluyendo la dimensión de la probeta y el tipo de curado al que ha sido sometida. La temporización y tipo de ensayo realizado se ha representado de la siguiente manera:

- RIM: resistividad indirecta, método de las 4 puntas, con el equipo de fabricación propia de base metacrilato.
- RIC: resistividad indirecta, método de las 4 puntas, con el equipo comercial.
- RD: resistividad directa.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.2.-** Resultados de los ensayos de resistividad con el tiempo de los morteros.

Muestra	Ensayo	3	8	14	28	42	60	93	129	162	224	240	270	297	325	368	511	714	879	
M1ANP	Días	12,8	23,4	30,8	46,0	50,3	60,1	60,1	71,6	72,8	74,2	82,5	85,1	95,0	93,9	96,3	96,5	105,7	111,9	
10x20	RIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	104,4	
Balsa	RIC	2	7	14	28	42	58	91	127	161	222	236	79,5	85,0	87,7	92,6	81,2	99,9	104,4	
M1ANPZT	Días	9,4	20,1	53,1	99,2	124,4	150,3	170,4	181,3	202,3	215,4	230,0	230,0	235,9	235,9	236,2	236,2	509	713	877
10x20	RIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	302,2	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265,6	
M1ANF	Días	4	7	14	28	42	60	92	120	155	207	239	270	294	294	236,5	194,9	226,4	226,4	
10x20	RIM	14,2	18,3	27,8	48,6	59,2	74,4	84,5	97,9	107,8	110,9	119,6	123,2	138,3	141,8	149,9	131,7	161,5	175,4	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172,3	
M1ANHS	Días	4	7	14	28	42	62	97	131	145	197	238	266	295	295	328	131,9	155,9	155,9	
10x20	RIM	25,9	45,0	76,0	135,3	179,7	242,4	308,2	262,5	364,7	381,7	387,6	408,6	411,4	438,8	415,3	421,0	457,5	457,5	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	473,3	
M1ASP	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	8,4	13,7	22,2	37,1	47,5	54,9	64,8	78,6	80,5	92,2	98,9	114,8	128,0	134,5	139,8	131,9	155,9	155,9	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172,3	
M1ASPT	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	7,7	15,9	35,4	59,4	76,2	95,9	121,7	147,7	155,5	182,4	194,5	222,9	224,5	238,1	260,0	260,0	260,0	260,0	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	299,7	
M1ASF	Días	3	7	14	28	42	60	88	133	157	200	235	269	297	297	329	329	329	329	
10x20	RIM	9,1	14,2	26,8	46,3	52,0	66,9	85,8	96,3	102,3	131,0	124,5	149,3	145,0	147,1	151,7	151,7	151,7	151,7	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	207,0	
M1ASHS	Días	2	7	14	28	42	63	98	132	146	198	239	116,9	132,5	132,9	145,1	146,2	159,1	194,1	
10x20	RIM	9,5	28,1	57,9	94,3	119,5	144,2	189,9	240,4	250,2	316,6	347,8	365,6	380,6	411,2	414,5	544,9	612,0	584,2	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	584,2	
M2ANP	Días	3	7	14	28	42	60	93	129	162	224	240	270	297	297	325	325	325	325	
10x20	RIM	9,6	33,0	72,7	139,7	163,7	214,3	251,2	285,6	307,3	343,9	361,7	383,3	403,5	403,5	395,1	395,1	395,1	395,1	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	439,5	
M2ANPZT	Días	2	7	14	28	42	58	91	127	161	222	238	268	306	306	324	324	324	324	
10x20	RIM	6,7	41,3	102,8	181,2	228,1	289,2	352,0	407,8	447,7	513,4	524,0	543,0	580,8	583,6	589,9	589,9	589,9	589,9	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	516,8	
M2ANF	Días	4	7	14	28	42	60	92	120	155	207	239	270	294	294	337	337	337	337	
10x20	RIM	11,0	26,1	80,2	150,5	182,7	225,5	254,3	318,5	357,4	372,3	375,0	407,3	416,8	432,5	445,6	445,6	443,7	443,7	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	515,2	
M2ANHS	Días	4	7	14	28	42	62	97	131	145	197	239	266	295	295	328	328	328	328	
10x20	RIM	31,0	83,3	188,2	388,3	571,2	847,9	1522,6	1796,1	1743,0	2057,1	2420,6	2422,1	2410,1	2885,6	2167,1	2887,2	3204,0	3204,0	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2511,9	
M2ASP	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	7,0	28,2	56,8	100,3	136,9	178,4	239,8	315,0	323,0	401,4	400,7	483,4	457,5	487,7	541,5	541,5	541,5	541,5	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2511,9	
M2ASF	Días	3	7	14	28	42	60	88	133	158	200	235	269	297	297	329	329	329	329	
10x20	RIM	8,3	23,1	45,5	74,5	90,6	126,0	172,2	228,3	241,9	311,9	319,3	379,5	402,5	418,4	435,6	435,6	435,6	435,6	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	433,5	
M2ASPT	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	7,0	23,3	47,7	74,9	94,2	119,5	142,1	188,5	195,6	244,4	257,3	311,9	296,6	305,1	355,7	343,8	343,8	343,8	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	391,8	
M2ANF	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	7,0	23,3	47,7	74,9	94,2	119,5	142,1	188,5	195,6	244,4	257,3	311,9	296,6	305,1	355,7	343,8	343,8	343,8	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	391,8	
M2ASPT	Días	2	7	14	28	42	62	91	138	152	205	240	272	293	293	331	331	331	331	
10x20	RIM	7,0	23,3	47,7	74,9	94,2	119,5	142,1	188,5	195,6	244,4	257,3	311,9	296,6	305,1	355,7	343,8	343,8	343,8	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	391,8	
M2ASF	Días	2	7	14	28	42	63	98	132	146	198	239	295	329	329	363	363	363	363	
10x20	RIM	9,4	44,6	109,4	302,0	497,8	702,8	1235,5	1363,1	1479,4	1816,8	1937,9	2041,0	2032,6	2130,0	1916,1	2413,8	2799,0	2463,0	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2247,2	

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.3.-** Resultados de los ensayos de resistividad con el tiempo de los hormigones de obra.

Muestra	Ensayo	Días	2	7	15	28	42	61	99	119	148	184	217	245	287	300	328	364	540	727	919	1097	1274	1454	1674	-				
H2	RIM	7.6	10.9	13.5	18.7	23.8	27.4	28.0	29.8	33.6	37.4	41.1	44.1	48.7	51.1	50.5	57.7	82.7	135.8	162.0	162.4	248.4	229.6	293.6	303.8	307.4	312.7			
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
H18	Días	3	7	14	28	41	61	90	117	145	187	229	242	270	304	327	368	595	734	989	10	1099	1242	1445	1644	1645	1644			
15x30	RIM	15.3	15.4	17.7	30.9	43.2	48.9	56.1	58.8	58.9	64.1	69.0	68.8	66.7	70.4	73.3	78.4	90.0	102.9	106.1	117.5	114.4	132.7	134.8	134.8	134.8	-			
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
H19	Días	3	7	14	28	44	67	88	121	149	191	219	246	270	289	330	352	365	561	731	951	1092	1284	1448	1647	1647	-			
15x30	RIM	24.0	34.4	56.6	88.2	105.7	122.7	133.5	146.1	155.2	167.3	177.4	175.82	174.6	108.0	200.3	200.4	197.3	197.5	269.7	258.5	293.6	303.8	307.4	312.7	-	-	-		
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H20	Días	3	7	15	28	43	57	85	127	155	182	211	246	275	301	330	367	552	730	906	1099	1276	1283	130.7	236.3	272.8	290.2	295.2		
15x30	RIM	16.0	34.4	41.3	56.5	68.0	77.3	87.0	96.1	110.8	111.1	114.4	126.6	132.5	131.6	136.3	151.0	169.35	200.0	272.5	271.8	291.5	351.7	371.5	371.5	371.5	-			
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H21	Días	3	7	15	28	43	57	85	127	155	182	211	246	275	301	337	367	552	730	906	1099	1276	1283	130.7	236.3	272.8	290.2	295.2		
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H23	Días	5	7	14	28	49	69	99	120	159	183	219	282	308	335	370	548	730	917	1097	1277	132.8	162.5	162.2	173.3	173.3	173.3	-		
15x30	RIM	22.4	24.4	29.8	40.9	51.9	59.5	63.0	74.5	76.0	76.9	88.2	94.3	94.3	97.1	110.8	117.7	127.7	130.7	152.7	162.5	162.2	173.3	173.3	173.3	-	-	-		
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H23	Días	5	7	14	28	49	69	99	120	159	183	219	282	308	335	370	548	730	917	1097	1277	132.8	162.5	162.2	173.3	173.3	173.3	-		
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H24	Días	3	5	7	12	28	47	67	120	118	157	181	217	280	306	333	368	546	728	915	1104	1281	1463	1463	1463	1463	1463	-		
15x30	RIM	22.2	22.4	23.0	25.5	29.4	34.6	38.7	41.4	47.2	48.5	49.9	56.8	60.2	58.0	64.1	67.0	79.2	85.8	91.5	106.0	1281	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	-		
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H24	Días	3	5	7	12	28	47	67	120	118	157	181	217	280	306	333	368	546	728	915	1104	1281	1463	1463	1463	1463	1463	-		
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
H25	Días	3	7	16	28	42	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
15x30	RIM	11.1	26.7	59.4	91.0	104.0	111.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H24	Días	3	5	7	12	28	47	67	89	118	157	181	217	280	306	333	368	546	728	915	1104	1281	1463	1463	1463	1463	1463	-		
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H26	Días	3	7	16	28	42	57	92	120	145	175	244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15x30	RIM	13.2	43.9	104.6	161.2	202.4	211.0	244.1	266.0	281.3	287.9	372.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H28	Días	4	6	14	28	42	62	91	118	153	222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15x30	RIM	17.9	28.9	95.2	168.8	197.8	244.9	291.6	367.8	398.6	473.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H27	Días	4	6	14	28	42	62	91	118	153	222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Balsa	RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H26	Días	3	7	10	28	49	58	93	120	150	177	199	262	276	301	335	367	542	723	917	1077	1284	1284	1284	1284	1284	1284	-		
15x30	RIM	13.7	23.7	31.7	48.3	62.7	68.1	75.3	83.8	93.8	96.6	97.6	113.6	112.7	104.7	116.4	125.0	151.9	192.6	215.1	248.9	278.2	278.2	278.2	278.2	278.2	278.2	-		
Camara RIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

**Tabla 5.3.-** Resultados de los ensayos de resistividad con el tiempo en hormigones de obra (continuación).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
*UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA*

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

---

08/06/2017 19:40:53

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

---

09/06/2017 11:30:19

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

---

28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.4.-** Resultados de los ensayos de resistividad con el tiempo en hormigones dosificados en laboratorio.

Muestra	Ensayo	Días	8	15	28	43	61	84	110	146	182	211	239	268	300	329	371	
D1P 15x30	RIM	36,8	42,3	72,0	115,4	144,5	163,0	188,6	207,6	216,7	219,7	217,4	223,2	225,9	228,3	235,7	236,9	
Balsa	RIC	36,7	43,2	67,9	109,5	136,2	151,8	175,6	187,4	198,5	202,8	208,3	225,5	223,3	227,5	228,	228,	
RD	37,0	43,3	66,1	102,0	118,8	141,8	164,9	189,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D1P 10x20	Días	5	8	15	28	43	61	84	110	146	182	211	239	-	-	-	-	
RIM	30,6	34,9	62,0	96,8	123,1	143,9	162,4	173,4	197,2	212,0	205,8	208,4	206,7	215,2	216,7	217,1	217,1	
Balsa	RIC	30,0	35,5	59,5	95,6	118,1	137,9	156,8	164,8	178,2	193,9	192,1	201,1	202,7	206,5	206,4	208,9	
RD	35,2	41,0	64,7	106,3	132,8	153,8	172,6	193,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2P 15x30	Días	3	7	16	28	42	57	92	120	145	-	-	-	-	-	-	-	
RIM	16,5	35,0	76,1	107,5	121,0	136,8	148,8	159,5	174,0	183,8	-	-	-	-	-	-	-	
Balsa	RIC	16,4	31,3	74,5	99,8	117,8	132,4	149,8	155,9	158,1	178,8	202,0	-	-	-	-	-	-
RD	17,7	34,9	75,9	104,8	131,5	140,0	158,7	171,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2F	Días	4	7	13	28	43	64	91	116	146	-	-	-	-	-	-	-	
RIM	20,6	29,5	63,7	104,8	119,2	135,7	155,0	171,8	197,3	211,8	-	-	-	-	-	-	-	
Balsa	RIC	20,4	26,2	61,9	97,2	117,1	130,1	145,9	171,2	186,1	205,0	-	-	-	-	-	-	-
RD	21,0	27,3	66,7	101,4	122,9	139,8	160,4	179,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2PT	Días	4	7	13	28	43	64	91	116	146	-	-	-	-	-	-	-	
RIM	21,6	48,4	74,3	111,9	145,7	169,5	218,0	220,1	243,6	285,1	-	-	-	-	-	-	-	
Balsa	RIC	20,7	45,0	71,6	113,8	142,5	166,5	209,3	222,7	231,9	263,2	-	-	-	-	-	-	-
RD	21,4	46,8	76,2	122,5	152,9	181,6	224,5	240,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2PV	Días	4	7	13	28	43	64	91	116	146	215	-	-	-	-	-	-	-
RIM	18,6	30,6	54,6	83,8	107,5	121,3	144,0	149,7	160,3	190,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	17,6	28,9	52,5	85,3	101,5	117,0	136,5	142,8	152,7	176,8	-	-	-	-	-	-	-
RD	18,8	30,1	56,2	94,1	112,4	128,8	145,3	146,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2HS	Días	3	6	16	28	43	57	99	125	157	-	-	-	-	-	-	-	
RIM	17,9	36,3	137,5	260,7	375,1	472,2	980,0	1253,4	1401,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	18,7	35,9	134,0	248,5	376,1	491,8	852,4	1175,6	1307,0	-	-	-	-	-	-	-	-
RD	19,8	38,0	135,4	260,3	401,1	477,9	921,7	1207,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D3P	Días	4	7	13	28	43	64	91	116	146	215	-	-	-	-	-	-	-
RIM	27,6	39,8	69,2	109,9	141,5	158,0	194,4	209,5	221,5	237,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	13,5	27,0	45,5	68,4	80,9	90,4	103,5	111,3	132,6	146,5	-	-	-	-	-	-	-
RD	15,7	33,4	48,2	71,3	84,5	100,3	109,7	127,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D3PT	Días	2	9	14	28	43	55	84	126	152	184	-	-	-	-	-	-	-
RIM	13,6	44,5	67,6	106,6	126,0	137,8	175,3	194,1	226,3	252,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	13,5	46,4	66,8	104,1	122,4	141,7	162,0	181,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RD	14,5	48,7	60,9	109,8	133,2	157,0	183,5	210,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D3Py	Días	3	8	16	28	44	54	91	126	146	178	-	-	-	-	-	-	-
RIM	19,0	31,2	55,5	86,2	104,0	107,6	131,7	133,6	150,7	164,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	17,8	31,3	58,4	80,4	98,5	102,1	132,9	134,4	142,4	156,2	-	-	-	-	-	-	-
RD	20,4	32,5	59,7	85,3	103,1	110,8	133,1	139,3	157	-	-	-	-	-	-	-	-	
D3HS	Días	3	6	16	28	43	57	99	125	157	-	-	-	-	-	-	-	-
RIM	20,8	38,0	172,1	283,9	424,2	515,6	1220,4	1633,8	1984,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Balsa	RIC	21,9	38,5	167,1	284,7	432,1	517,2	1034,8	1511,1	1730,3	-	-	-	-	-	-	-	-
RD	22,9	38,3	167,6	295,3	463,3	524,8	1190,6	1709,9	1810,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.4.-** Resultados de los ensayos de resistividad con el tiempo en hormigones dosificados en laboratorio (continuación).

Muestra	Ensayo	Días	3	8	16	28	44	54	91	126	146	178
D3PC	RIM	16,9	32,0	67,2	79,4	109,4	114,3	136,1	136,1	171,1	185,3	-
15x30	RIM	17,8	31,2	58,1	80,7	101,4	114,2	132,5	132,5	162,9	176,5	-
Bolsa	RIC	18,5	32,4	60,3	86,8	109,1	116,0	147,4	158,5	-	-	-
D4F	Días	3	9	16	28	41	63	92	110	150	-	-
15x30	RIM	16,3	39,2	71,7	98,9	107,7	130,7	151,4	176,1	196,0	-	-
Bolsa	RIC	20,1	38,9	72,9	99,2	104,8	129,5	142,7	165,2	179,5	-	-
Rd	20,0	41,4	71,6	100,1	109,6	133,9	154,9	182,8	-	-	-	-
D4PT	Días	4	7	16	28	39	61	90	110	148	-	-
15x30	RIM	23,3	44,7	82,5	120,0	145,7	163,1	214,1	254,8	265,5	-	-
Bolsa	RIC	22,9	32,9	88,3	120,6	138,4	166,8	204,4	230,8	249,1	-	-
RD	23,8	44,4	84,3	118,3	144,6	163,3	212,8	250,5	-	-	-	-
D4PV	Días	3	9	16	28	41	63	92	110	150	-	-
15x30	RIM	19,8	38,8	71,0	96,8	110,5	131,0	143,6	176,6	187,4	-	-
Bolsa	RIC	20,3	38,0	73,3	98,0	105,0	127,8	137,6	156,8	173,8	-	-
RD	20,4	40,4	74,4	100,5	107,3	133,4	153,0	174,9	-	-	-	-
D4HS	Días	3	9	16	28	41	63	92	110	150	-	-
15x30	RIM	18,2	72,9	131,7	205,5	244,7	319,5	505,6	653,1	732,4	-	-
Bolsa	RIC	18,2	72,6	130,3	203,6	235,2	327,2	466,8	593,9	682,9	-	-
RD	18,5	72,5	144,8	221,5	254,2	328,8	492,8	641,5	-	-	-	-
D4PC	Días	4	7	16	28	39	61	90	110	148	-	-
15x30	RIM	23,4	32,0	69,5	105,3	108,5	133,3	161,5	185,1	198,8	-	-
Bolsa	RIC	22,9	32,9	68,1	95,3	103,8	134,7	151,6	172,7	183,8	-	-
RD	23,8	33,0	76,4	103,1	110,8	140,4	164,7	189,6	-	-	-	-

**5.2.1. Evolución de la resistividad eléctrica de las muestras de mortero.**

Se ensayaron, para diferentes tiempos de curado, todas las muestras de morteros descritas en el capítulo 3 (tabla 3.12) por el método de la resistividad indirecta descrito en el apartado 3.2.6.2. En la figura 5.1 se representa el total de las medidas de los resultados para el conjunto de las 16 muestras de mortero de 10x20 ensayadas, apreciándose en todas ellas el aumento de la resistividad con el tiempo de curado. Se observa una rápida evolución de la resistividad durante los primeros 90 días de curado, estabilizándose luego su valor de resistividad y exhibiendo un ligero aumento a mayores edades. Dicha variación se ajusta a una ley potencial del tipo mostrado en la ecuación (5.1):

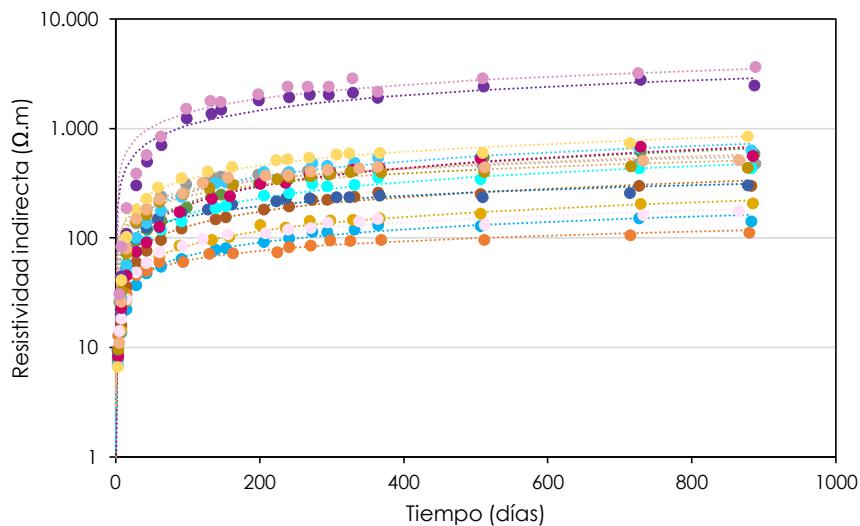
$$\rho = a \cdot t^n \quad (5.1)$$

donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot m$ ),  $t$  el tiempo de exposición (días) y  $a$  y  $n$  constantes. En la figura 5.1 se han representado los ajustes de los datos

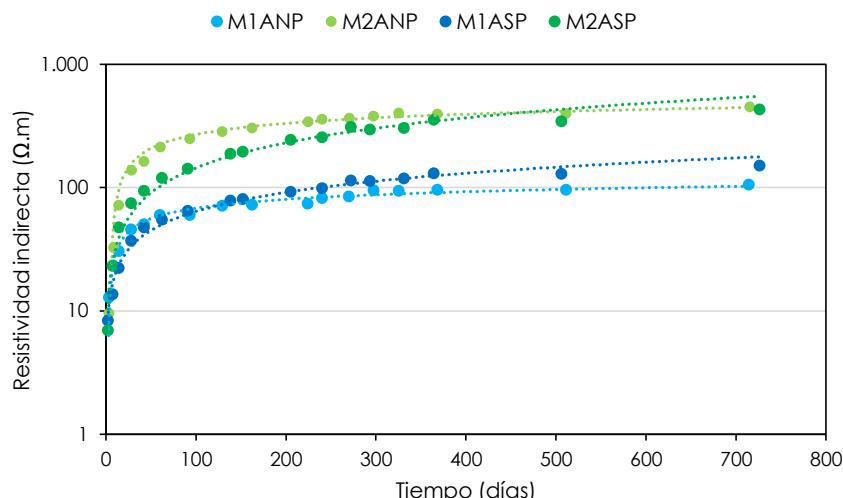
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

experimentales a la anterior ley potencial. En la figura 5.2 se representa la variación de la resistividad de los cuatro morteros patrón, así como su ajuste a la ley potencial.

● M1ASP ● M1ASPZT ● M1ASF ● M1ASHS ● M1ANP ● M1ANPZT ● M1ANF ● M1ANHS  
 ● M2ASP ● M2ASPZT ● M2ASF ● M2ASHS ● M2ANP ● M2ANPZT ● M2ANF ● M2ANHS



**Figura 5.1.-** Evolución de la resistividad indirecta de morteros fabricados en Canarias medida en probetas de tamaño 10x20.



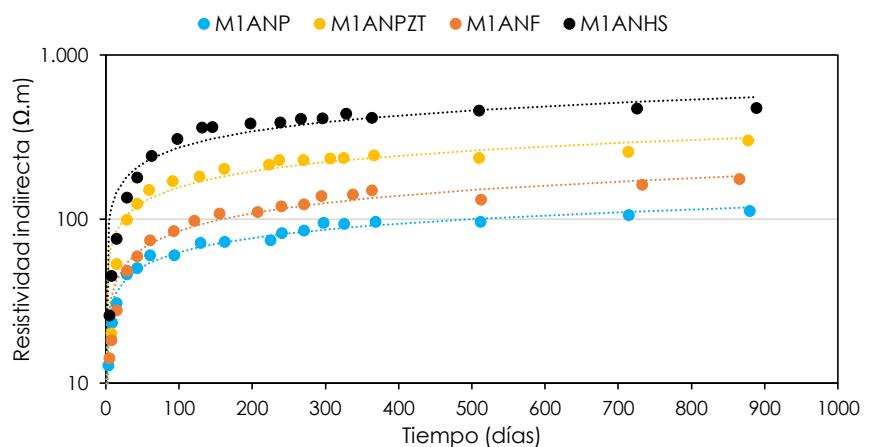
**Figura 5.2.-** Evolución de la resistividad indirecta de los cuatro morteros patrón de tamaño 10x20.

En la tabla 5.5 se muestran los valores obtenidos en el ajuste de los datos de resistividad al modelo potencial (ecuación (5.1)), obteniéndose unos índices de regresión superiores a 0,9 en casi todos los casos analizados, a excepción del mortero M2ANHS. Se observan menores valores de resistividad para el grupo de morteros M1, que son los fabricados con cemento CEMII, respecto al grupo de morteros M2 fabricados con cemento CEM IV. A su vez, los morteros M1 fabricados con arena "ensacada" exhiben los menores valores de resistividad. En el caso de los morteros del grupo M2, dicha diferencia no es tan evidente.

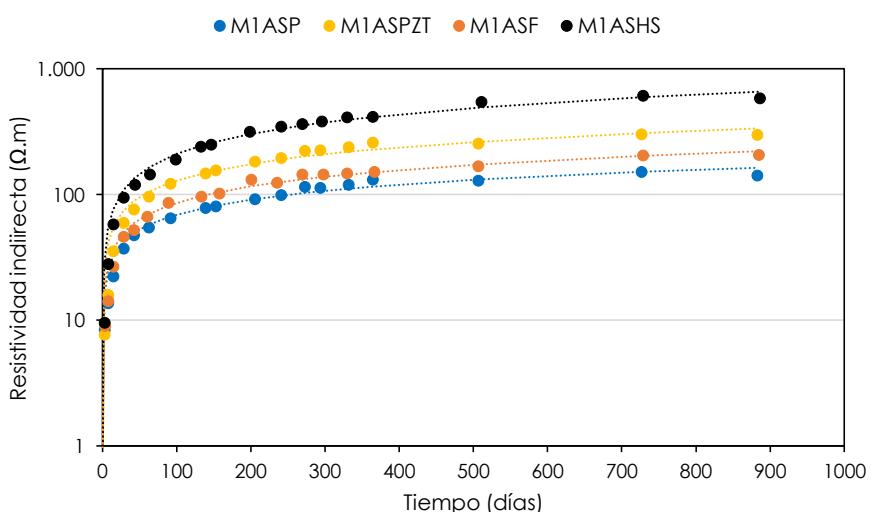
**Tabla 5.5.-** Resultados del ajuste de la ley potencial a los datos de resistividad indirecta de los morteros fabricados en Canarias medida en probetas de tamaño 10x20.

Muestra	a	n	R <sup>2</sup>	Muestra	a	n	R <sup>2</sup>
M1ASP	11,3415	0,3928	0,9670	M2ASP	17,9480	0,4827	0,9670
M1ASF	11,6278	0,4338	0,9843	M2ASF	15,5778	0,5562	0,9609
M1ASHS	19,0465	0,5217	0,9813	M2ASHS	132,2308	0,4539	0,9302
M1ASPZT	17,135	0,4384	0,9685	M2ASPZT	30,2790	0,4683	0,9685
M1ANP	16,5251	0,2897	0,9732	M2ANP	49,0579	0,3457	0,9375
M1ANF	16,4190	0,3564	0,9601	M2ANF	49,7259	0,3615	0,9465
M1ANHS	61,5017	0,3237	0,9162	M2ANHS	199,7561	0,4221	0,8891
M1ANPZT	36,5236	0,3167	0,9374	M2ANPZT	51,275	0,4141	0,9756

En las figuras 5.3 a 5.6 se representan los datos de resistividad en función del tipo de cemento y del tipo de arena, incluyendo al patrón sin adiciones y con los tres tipos diferentes de adiciones descritas en el capítulo 3 (puzolánica (PZ), filler o polvillo de machaqueo de áridos para asfaltos (F) y humo de sílice (HS)). La figura 5.3 incluye a los cuatro morteros M1, fabricados con cemento tipo CEMII y con arena normalizada (AN). La figura 5.4 incluye a los cuatro morteros M1, fabricados con cemento tipo CEMII y con arena ensacada (AS). La figura 5.5 incluye a los cuatro morteros M2, fabricados con cemento tipo CEM IV y con arena normalizada (AN). La figura 5.6 incluye a los cuatro morteros M2, fabricados con cemento tipo CEM IV y con arena ensacada (AS). En los cuatro grupos se obtiene la misma tendencia de aumento de la resistividad eléctrica con el tiempo de curado, al fabricar las probetas con las tres adiciones respecto a la muestra patrón, siendo mayor el aumento al adicionar humo de sílice, seguido por puzolana y obteniéndose el menor de los aumentos al adicionar filler o polvillo de áridos para asfaltos, llegando a ser inapreciable en alguno de los casos.

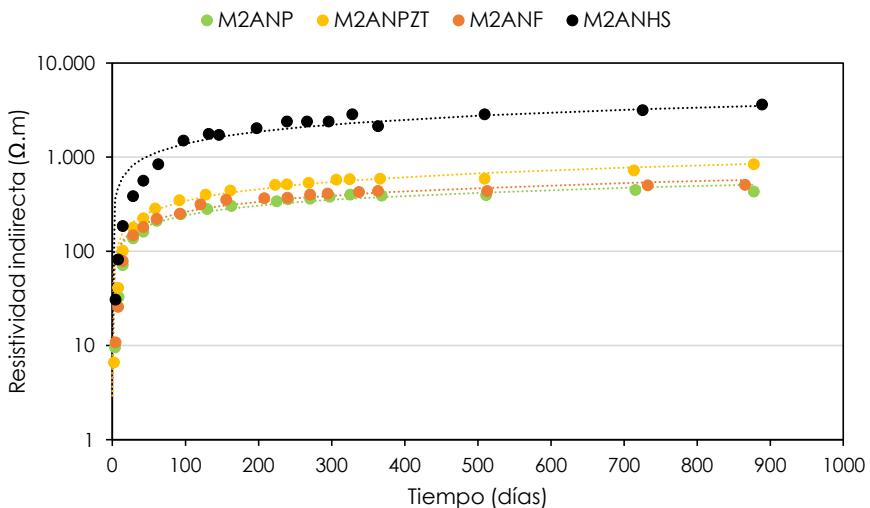


**Figura 5.3.-** Evolución de la resistividad indirecta de los cuatro morteros fabricados con cemento tipo CEMII y arena normalizada, con y sin adiciones.

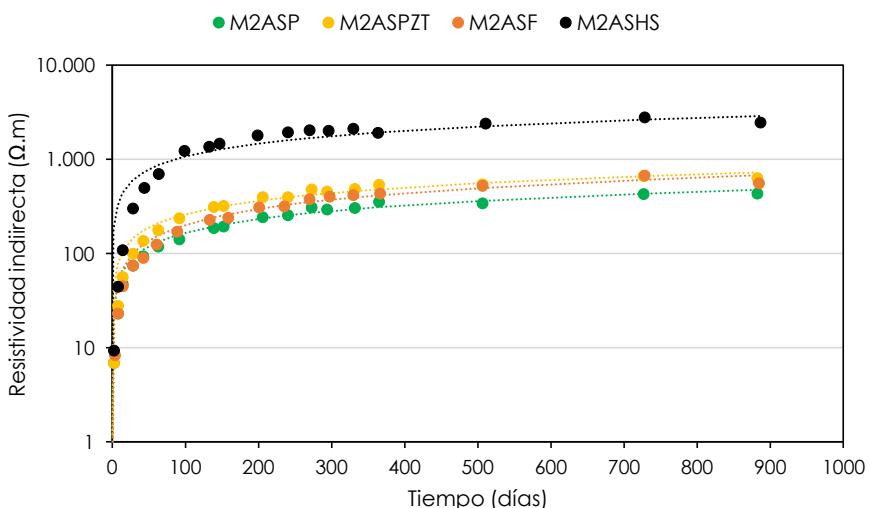


**Figura 5.4.-** Evolución de la resistividad indirecta de los cuatro morteros fabricados con cemento tipo CEMII y arena ensacada, con y sin adiciones.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 5.5.-** Evolución de la resistividad indirecta de los cuatro morteros fabricados con cemento CEM IV y arena normalizada, con y sin adiciones.



**Figura 5.6.-** Evolución de la resistividad indirecta de los cuatro morteros fabricados con cemento CEM IV y arena ensacada, con y sin adiciones.

El efecto de la variación de la resistividad indirecta con respecto a las adiciones (figuras 5.3 a 5.6) sigue el patrón esperado si se tienen en cuenta las reacciones que tienen lugar en los morteros al adicionar compuestos de naturaleza puzolánica. Tal y como se introdujo en el capítulo 2, los aluminosilicatos presentes en el humo de sílice como la puzolana de toba reaccionan con el hidróxido de calcio

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

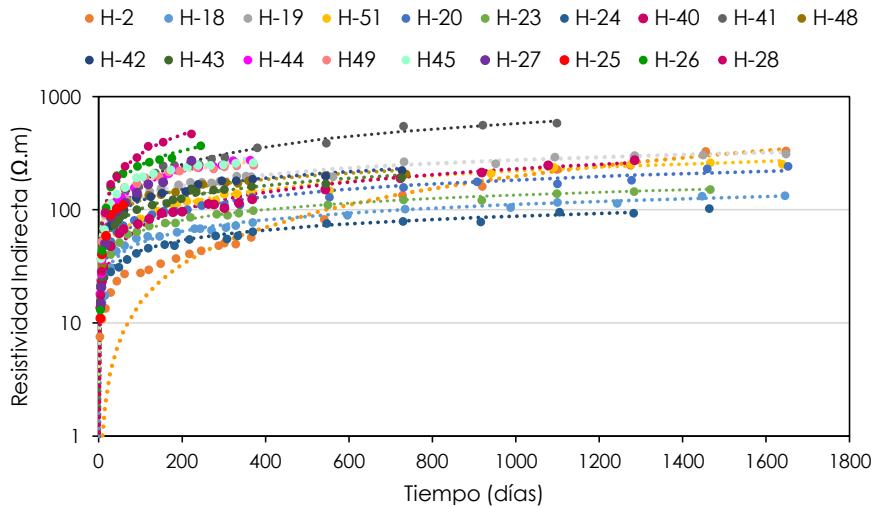
formado en la reacción de hidratación del cemento Portland, dando lugar a silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida (CSH)<sub>p</sub>. Entre las características de esta reacción se encuentra el hecho de que, al producirse a un tiempo posterior a la hidratación del cemento, los productos de reacción llenan de forma muy eficiente los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento. Esto provoca una menor porosidad y una mejora tanto de la impermeabilidad como de la resistencia mecánica del sistema.

Este hecho es observado en los morteros fabricados tanto con cemento tipo CEMII y tipo CEMIV indistintamente. Las probetas fabricadas tanto con adiciones de humo de sílice como con puzolana de toba exhiben mayores valores de resistividad eléctrica como consecuencia de una menor porosidad de la muestra. Dicho efecto es menos acusado en el caso del filler.

#### **5.2.2. Evolución de la resistividad eléctrica en hormigones de obra y fabricados en laboratorio.**

En las figuras 5.7 y 5.8 se recoge la evolución temporal de los valores de resistividad eléctrica medida por el método indirecto, de cada una de las diferentes muestras de hormigón ensayadas. En todas ellas se observa un aumento potencial de la resistividad eléctrica con respecto al tiempo para una misma muestra, al igual que ocurriera con las muestras de mortero. Así, se obtiene una variación de la resistividad muy elevada para los primeros días de exposición, ralentizándose a partir de unos 90 días, aproximadamente. En las mismas gráficas se muestra el ajuste de los datos experimentales según la ley potencial mostrada en la ecuación (5.1). En las tablas 5.6 y 5.7 se muestran los valores obtenidos al ajustar los distintos datos experimentales obtenidos para cada una de las probetas ensayadas con la ley potencial descrita en la ecuación (5.1).

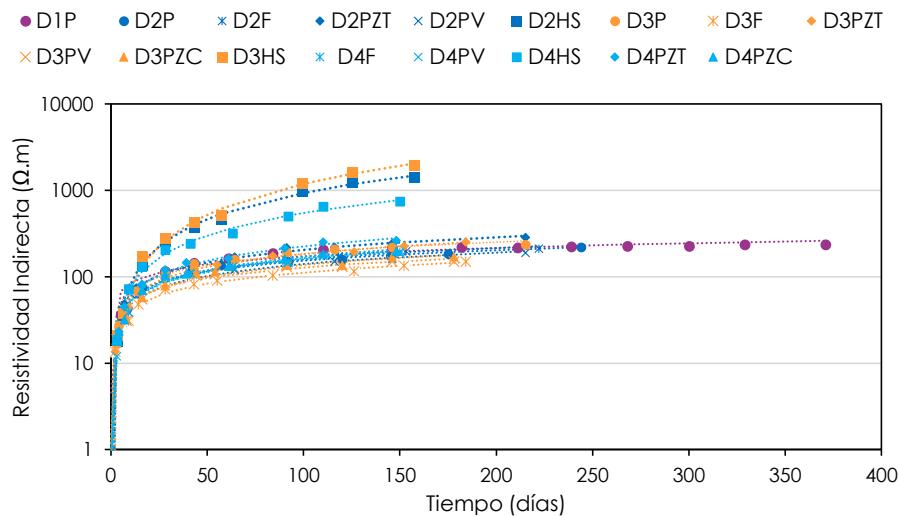
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 5.7.-** Evolución de la resistividad indirecta de hormigones de obra de tamaño 15x30.

**Tabla 5.6.-** Resultados del ajuste de la ley potencial a los datos de resistividad de Wenner o de cuatro puntas, de los hormigones de obra de tamaño 15x30.

Muestra	a	n	R <sup>2</sup>	Muestra	a	n	R <sup>2</sup>
H2	0,0892	1,1153	0,9836	H40	6,6148	0,5135	0,9786
H18	10,5469	0,3416	0,9836	H41	16,0140	0,5197	0,9862
H19	29,5125	0,3232	0,9788	H42	26,5881	0,3284	0,9849
H20	14,0308	0,3724	0,9677	H43	20,5436	0,3475	0,9750
H23	14,9961	0,3178	0,9944	H44	23,4045	0,4230	0,9899
H24	10,5711	0,3067	0,9825	H45	35,0635	0,3534	0,9705
H25	13,1331	0,5452	0,9646	H48	29,1181	0,3097	0,9666
H26	34,1609	0,4301	0,9669	H49	38,4992	0,3268	0,9784
H27	9,0135	0,6184	0,9760	H51	12,3223	0,4176	0,9884
H28	22,2172	0,5736	0,9849				



**Figura 5.8.-** Evolución de la resistividad indirecta de hormigones dosificados amasados en el laboratorio, de tamaño 15x30.

**Tabla 5.7.** Parámetros de ajuste de la ley potencial a los datos de resistividad de Wenner o de cuatro puntas, de los hormigones dosificados amasados en el laboratorio, de tamaño 15x30.

Muestra	a	n	R <sup>2</sup>	Muestra	a	n	R <sup>2</sup>
D1P	40,2992	0,3157	0,9259	D3PV	19,7062	0,40618	0,9644
D2P	24,2302	0,40102	0,9696	D3PZC	17,0767	0,45325	0,9721
D2F	21,1992	0,43762	0,9749	D3HS	5,0779	1,18573	0,9947
D2PZT	22,361	0,48169	0,9845	D4F	16,9589	0,49216	0,9873
D2PV	17,9722	0,44614	0,9799	D4PZT	18,0104	0,54907	0,9852
D2HS	8,7447	1,01426	0,9913	D4PV	16,9800	0,48691	0,9754
D3P	24,7329	0,43811	0,9719	D4PZC	16,9945	0,50077	0,9835
D3F	14,8464	0,44003	0,9869	D3HS	10,8058	0,85251	0,9868
D3PZT	17,9261	0,50548	0,9909				

En la figura 5.7 se observa que todos los hormigones de obra ensayados presentan la misma tendencia y un buen ajuste a la ley potencial descrita por la ecuación (5.1). Todos ellos presentan un fuerte aumento de la resistividad en los primeros 90 días de curado, disminuyendo la velocidad de variación para tiempos superiores. Un caso especial sería la muestra H2, cuyo aumento de la resistividad no se estabiliza a partir de los 90 días de forma similar al resto de las probetas. Esto es debido a que se trata de un hormigón HM-20, no estructural, con una resistencia de

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

12,18 N/mm<sup>2</sup> inferior a la resistencia característica de su clase, por lo que su porosidad es muy elevada como ya se comentó en el capítulo 4.

Las variaciones de la resistividad observadas en las probetas de hormigón dosificado amasado en laboratorio (figura 5.8) presentan un perfil de variación similar a las probetas de hormigón de obra, ajustándose de forma satisfactoria a la ley potencial (tabla 5.7). Las adiciones realizadas a las probetas no merman la resistividad eléctrica medida, destacando estas probetas por presentar una variación muy drástica de dicha variable durante el primer mes de exposición y medida. Destacan las tres muestras que incorporan en su formulación la adición del 20% de humo de sílice (muestras D2HS, D3HS y D4HS). Los valores de resistividad obtenidos llegan a ser de hasta un orden de magnitud superior a las del resto de probetas dosificadas y de las probetas de hormigón de obra.

### 5.2.3. Efecto del tipo de curado en la evolución de la resistividad eléctrica.

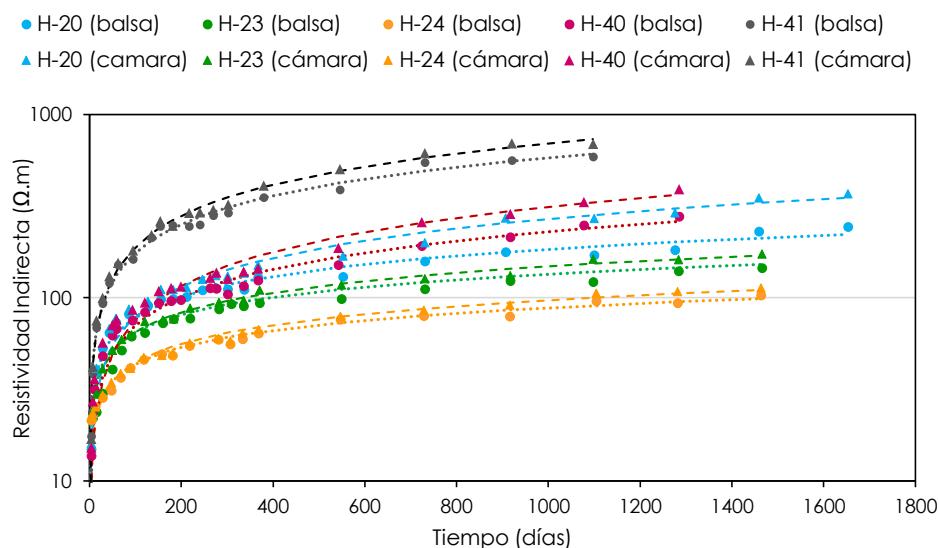
En la figura 5.9 se aprecia la diferencia en la evolución de los valores de resistividad indirecta de cinco de las muestras, en las que dos probetas gemelas de una misma muestra han sido curadas siguiendo dos procedimientos diferentes de curado: sumergiéndolas en agua en una balsa que identificaremos en las gráficas y leyendas como "balsa", y un segundo tipo de curado, consistente en ubicarlas en el interior de una cámara húmeda (20 °C y 95% de humedad) que identificaremos en las gráficas y leyendas como "cámara".

En la tabla 5.8 se muestran los resultados obtenidos al ajustar los datos de resistividad anteriores a la ley potencial descrita en la ecuación (5.1).

**Tabla 5.8.-** Parámetros de ajuste de la ley potencial a los datos de resistividad de Wenner o de cuatro puntas, de cinco muestras de hormigones con dos tipos de curado distinto (en balsa y en cámara).

<b>Muestras</b>	<b>Curado en balsa</b>			<b>Curado en cámara</b>		
	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
H20	14,0308	0,3724	0,9677	6,8718	0,5309	0,9767
H23	14,9961	0,3178	0,9944	12,4388	0,3588	0,9904
H24	10,5711	0,3066	0,9825	9,2470	0,3401	0,9837
H40	6,6146	0,5134	0,9786	4,4139	0,6169	0,9732
H41	16,0140	0,5197	0,9862	13,8355	0,5673	0,9909

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



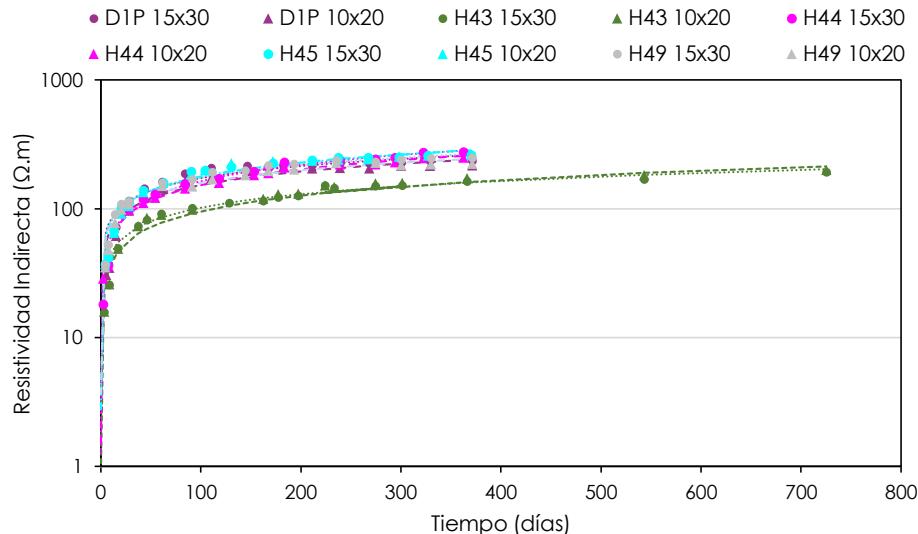
**Figura 5.9.-** Evolución de la resistividad indirecta de hormigones de obra, de tamaño 15x30, con los dos tipos diferentes de curado, (balsa o en cámara húmeda).

A partir de los datos anteriores se observa que el perfil de variación de la resistividad eléctrica es idéntico en ambos casos e independiente del tipo de curado al que se somete la probeta de hormigón, lo que indica que las reacciones químicas involucradas en el proceso no se ven afectadas por este proceso. En todos los casos analizados, se obtienen muy buenos valores de ajuste a la ley potencial descrita en la ecuación (5.1). Si bien los perfiles de variación son idénticos e independientes del tipo de curado al que se ha sometido la probeta, los valores de resistividad obtenidos para las probetas curadas en balsa son ligeramente inferiores a los obtenidos en cámara para todos los casos analizados. La muestra de hormigón H20, la de menor resistencia a compresión de las cinco representadas, muestra la mayor diferencia de resistividades en función del tipo de curado.

#### 5.2.4. Efecto de las dimensiones de las probetas en la evolución de la resistividad eléctrica.

En la figura 5.10 se muestra la comparativa de la evolución de los valores de resistividad indirecta de cinco de las muestras, en las que dos probetas gemelas se han fabricado de dos dimensiones distintas (15x30 y 10x20), siendo ambas curadas por el mismo procedimiento (balsa y cámara).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 5.10.-** Evolución de la resistividad indirecta de hormigones fabricados en obra, de tamaño 15x30 y 10x20.

En la tabla 5.9 se muestran los resultados obtenidos al ajustar los datos de resistividad anteriores a la ley potencial descrita en la ecuación (5.1).

**Tabla 5.9.-** Resultados de ajuste de la ley potencial a los datos de resistividad indirecta, de cinco muestras de hormigones de dos dimensiones distintas (15x30 y 10x20).

<b>Muestras</b>	<b>15x30</b>			<b>10x20</b>		
	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
D1P	40,2992	0,3157	0,9260	31,5623	0,3435	0,9456
H43	20,5437	0,3475	0,9750	14,8344	0,4044	0,8065
H44	23,4045	0,4230	0,9899	24,2086	0,4011	0,9921
H45	35,0635	0,3534	0,9706	33,6213	0,3612	0,9656
H49	38,4993	0,3268	0,9784	35,0239	0,3278	0,9729

A partir de los datos anteriores se observa que el perfil de variación de la resistividad eléctrica de las cinco muestras es muy parecido en ambos casos e independiente del tipo de dimensión de la probeta de hormigón. En todos los casos analizados, se obtienen muy buenos valores de ajuste a la ley potencial descrita en la ecuación (5.1). Si bien los perfiles de variación son similares, los valores de

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

resistividad obtenidos para las probetas de 15x30 son ligeramente superiores a los obtenidos sobre las probetas de 10x20.

### 5.3. Comparativa y validación de la resistividad indirecta medida con el equipo de construcción propia.

Para las medidas de resistividad eléctrica por el método indirecto, como se ha mencionado anteriormente, se ha contado primero con un equipo de fabricación propio siguiendo las indicaciones de la norma UNE 83988-2 [3] adquiriéndose posteriormente un equipo comercial. Desde las primeras medidas comparativas en una misma muestra y a una misma edad, se ha observado una pequeña diferencia entre los resultados obtenidos con ambos equipos, siendo generalmente menor el valor de resistividad obtenido con el equipo comercial respecto al obtenido con el equipo de fabricación manual. Se calculó la diferencia entre las dos medidas mediante la relación de la resistividad indirecta obtenida, cuyos datos se recogen en la tabla 5.10 para diferentes muestras de hormigón a diferentes edades y con diferentes tamaños de probetas, dando relaciones muy parecidas con un promedio de 0,95, según se representa en la figura 5.11.

A priori no se puede saber cuál es el valor más aproximado al real, hasta no compararse ambos dispositivos con el método directo o de referencia. Dicho análisis es realizado en el apartado 5.4 del presente capítulo.

**Tabla 5.10.-** Comparativa de resultados de medidas de la resistividad eléctrica por el método indirecto con el equipo de fabricación propia de metacrilato (RIM) y el equipo comercial (RIC).

Muestra	Edad (días)	RIM ( $\Omega \cdot m$ )	RIC ( $\Omega \cdot m$ )	RIC/RIM	Muestra	Edad (días)	RIM ( $\Omega \cdot m$ )	RIC ( $\Omega \cdot m$ )	RIC/RIM
H2	1097	378,75	366,75	0,97	H18	986	346,70	321,83	0,93
H2	1274	409,83	406,17	0,99	H18	1099	393,08	367,25	0,93
H2	1454	545,27	504,17	0,92	H18	1242	419,26	395,83	0,94
H2	1454	551,78	550,15	1,00	H18	1445	434,56	424,58	0,98
H19	951	426,45	392,25	0,92	H-20	906	293,75	273,67	0,93
H19	1092	484,46	452,83	0,94	H-20	1099	283,29	263,83	0,93
H19	1284	501,33	444,50	0,89	H-20	1276	302,44	285,33	0,94
H19	1474	507,10	480,68	0,95	H-20	1458	380,61	338,83	0,89
H19	1647	515,87	490,00	0,95	H-20	1652	612,98	475,50	0,78

Tabla 5.10.- (Continuación).

Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM	Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM
H23	730	204,78	190,50	0,93	H24	728	131,80	124,00	0,94
H23	917	201,95	192,00	0,95	H24	915	130,70	125,33	0,96
H23	1097	232,07	213,83	0,92	H24	1104	159,20	141,17	0,89
H23	1283	241,07	216,80	0,90	H24	1281	154,61	147,00	0,95
H23	1465	250,80	231,30	0,92	H24	1463	171,27	154,70	0,90
H25	2	18,30	17,80	0,97	H26	2	21,80	21,30	0,98
H25	7	44,00	40,80	0,93	H26	7	72,30	64,50	0,89
H25	16	98,10	95,20	0,97	H26	16	172,60	175,30	1,02
H25	28	150,20	134,20	0,89	H26	28	265,90	241,00	0,91
H25	42	171,60	162,20	0,95	H26	42	333,90	302,30	0,91
H25	57	183,40	183,00	1,00	H26	57	348,10	342,30	0,98
H25	2	18,30	17,80	0,97	H26	92	402,77	398,30	0,99
					H26	120	438,90	420,20	0,96
					H26	145	464,15	426,50	0,92
					H26	175	479,33	443,80	0,93
					H26	244	615,12	564,80	0,92
H27	4	24,50	24,30	0,99	H28	4	29,50	29,50	1,00
H27	6	34,40	31,00	0,90	H28	6	47,60	43,30	0,91
H27	14	83,90	79,30	0,95	H28	14	157,10	152,50	0,97
H27	28	142,60	135,70	0,95	H28	28	278,40	257,20	0,92
H27	42	161,21	165,80	1,03	H28	42	326,37	324,50	0,99
H27	62	192,23	192,80	1,00	H28	62	404,09	386,80	0,96
H27	91	235,79	226,50	0,96	H28	91	481,10	460,50	0,96
H27	118	278,03	271,80	0,98	H28	118	606,87	578,30	0,95
H27	153	290,07	287,70	0,99	H28	153	657,69	618,30	0,94
H27	222	451,11	388,50	0,86	H28	222	780,45	688,50	0,88
H40	723	317,74	295,67	0,93	H41	379	586,56	580,83	0,99
H40	917	354,95	337,67	0,95	H41	545	643,10	570,17	0,89
H40	1095	410,72	399,33	0,97	H41	730	908,21	759,83	0,84
H40	1284	459,03	454,00	0,99	H41	920	962,88	864,67	0,90
					H41	1097	970,70	878,00	0,90
H42	14	83,36	79,83	0,96	H43	3	26,05	24,83	0,95
H42	28	121,35	120,83	1,00	H43	8	42,39	40,50	0,96
H42	48	154,19	157,00	1,02	H43	17	81,93	78,17	0,95
H42	60	165,36	167,00	1,01	H43	37	121,88	120,17	0,99
H42	90	211,78	190,83	0,90	H43	46	134,93	126,17	0,94
H42	124	216,94	208,50	0,96	H43	60	151,11	141,00	0,93
H42	151	233,91	218,67	0,93	H43	91	167,59	152,83	0,91
H42	208	241,35	228,00	0,94	H43	128	183,45	169,33	0,92
H42	222	253,59	237,17	0,94	H43	162	189,69	181,50	0,96
H42	238	279,31	270,50	0,97	H43	177	203,33	187,50	0,92

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento:	927280
Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.10.- (Continuación).**

Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/ RIM	Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/ RIM
H42	294	300,04	279,83	0,93	H43	197	208,53	187,50	0,90
H42	329	302,00	285,17	0,94	H43	274	248,30	235,00	0,95
H42	368	309,06	290,17	0,94	H43	301	250,64	243,00	0,97
H42	544	331,32	332,30	1,00	H43	324	251,30	243,17	0,97
H42	726	372,57	353,80	0,95	H43	366	269,07	248,67	0,92
H42	14	83,36	79,83	0,96	H43	543	281,00	268,30	0,95
H42	28	121,35	120,83	1,00	H43	725	320,43	297,50	0,93
H45	4	61,53	57,20	0,93	H48	3	34,00	32,00	0,94
H45	7	69,20	67,80	0,98	H48	8	54,90	57,00	1,04
H45	13	111,10	103,30	0,93	H48	11	79,00	76,00	0,96
H45	21	167,30	158,50	0,95	H48	21	129,60	121,70	0,94
H45	28	187,00	181,20	0,97	H48	29	148,60	140,20	0,94
H45	42	228,40	212,50	0,93	H48	38	161,70	154,80	0,96
H45	62	262,20	246,20	0,94	H48	67	194,60	172,30	0,89
H45	90	320,70	282,80	0,88	H48	93	225,10	220,70	0,98
H45	104	326,54	311,30	0,95	H48	119	225,21	202,33	0,90
H45	130	348,15	320,00	0,92	H48	149	225,34	215,50	0,96
H45	172	374,55	366,70	0,98	H48	183	238,67	228,00	0,96
H45	211	392,70	376,30	0,96	H48	218	246,14	231,67	0,94
H45	237	412,01	376,80	0,91	H48	232	251,90	230,83	0,92
H45	267	411,51	389,00	0,95	H48	248	280,84	259,33	0,92
H45	298	416,96	380,80	0,91	H48	304	292,66	271,33	0,93
H45	327	428,34	398,20	0,93	H48	332	286,51	267,33	0,93
H45	370	432,80	398,20	0,92	H48	359	301,62	277,50	0,92
					H48	542	335,19	300,00	0,90
					H48	736	345,51	326,80	0,95
H49	4	60,90	60,50	0,99	H51	939	346,70	321,83	0,93
H49	7	87,50	81,30	0,93	H51	1090	393,08	367,25	0,93
H49	14	150,40	139,20	0,93	H51	1275	419,26	395,83	0,94
H49	20	180,20	162,20	0,90	H51	1465	434,56	424,58	0,98
H49	28	188,00	190,30	1,01	H51	1638	421,08	411,25	0,98
H49	61	262,20	249,50	0,95					
H49	91	281,70	280,70	1,00					
H49	111	319,40	290,50	0,91					
H49	144	327,70	310,30	0,95					
H49	167	360,53	337,00	0,93					
H49	193	368,45	340,80	0,92					
H49	235	395,51	381,00	0,96					
H49	274	385,94	374,70	0,97					
H49	300	399,63	375,00	0,94					
H49	371	413,16	378,80	0,92					

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Tabla 5.10.- (Continuación).

Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM	Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM
D1P	5	60,70	60,50	1,00	D2P	2	27,30	27,00	0,99
D1P	10	69,80	71,30	1,02	D2P	7	57,70	51,70	0,90
D1P	15	118,80	112,00	0,94	D2P	16	125,60	123,00	0,98
D1P	28	190,50	180,70	0,95	D2P	28	177,30	164,70	0,93
D1P	43	238,40	224,80	0,94	D2P	42	199,60	194,30	0,97
D1P	61	269,00	250,50	0,93	D2P	57	225,80	218,50	0,97
D1P	84	311,19	289,80	0,93	D2P	92	245,60	247,20	1,01
D1P	110	342,54	309,20	0,90	D2P	120	263,10	257,20	0,98
D1P	146	357,56	327,50	0,92	D2P	145	287,10	260,80	0,91
D1P	182	395,51	334,70	0,85	D2P	175	303,27	295,00	0,97
D1P	211	358,71	343,70	0,96					
D1P	232	368,28	372,00	1,01					
D1P	268	372,74	368,50	0,99					
D1P	300	376,70	375,30	1,00					
D1P	329	388,91	376,80	0,97					
D1P	371	390,89	377,50	0,97					
D2F	4	34,10	33,70	0,99	D2PZT	4	35,60	34,20	0,96
D2F	6	48,70	43,30	0,89	D2PZT	7	79,80	74,20	0,93
D2F	14	105,10	102,20	0,97	D2PZT	13	122,60	118,20	0,96
D2F	28	172,90	160,30	0,93	D2PZT	28	184,60	187,70	1,02
D2F	42	196,68	193,20	0,98	D2PZT	43	240,41	235,20	0,98
D2F	62	223,91	214,70	0,96	D2PZT	64	279,68	274,80	0,98
D2F	91	255,75	240,80	0,94	D2PZT	91	359,80	345,30	0,96
D2F	118	283,47	282,50	1,00	D2PZT	116	363,10	367,50	1,01
D2F	153	325,55	307,00	0,94	D2PZT	146	401,94	382,70	0,95
D2F	222	349,47	338,20	0,97					
D2PV	4	30,70	29,00	0,94	D2HS	3	29,54	30,80	1,04
D2PV	7	50,40	47,70	0,95	D2HS	6	59,90	59,20	0,99
D2PV	13	90,10	86,70	0,96	D2HS	16	226,88	221,10	0,97
D2PV	28	138,30	140,80	1,02	D2HS	28	430,10	410,00	0,95
D2PV	43	177,38	167,50	0,94	D2HS	43	618,90	620,50	1,00
D2PV	64	200,15	193,00	0,96	D2HS	57	779,10	811,50	1,04
D2PV	91	237,60	225,20	0,95	D2HS	99	1617,80	1406,50	0,87
D2PV	116	247,00	235,70	0,95	D2HS	125	2068,20	1939,80	0,94
D2PV	146	264,50	252,00	0,95	D2HS	157	2312,81	2156,50	0,93
D2PV	215	314,33	291,80	0,93					
D3P	4	45,50	46,20	1,02	D3F	2	22,44	22,30	0,99
D3P	7	65,60	62,70	0,96	D3F	9	49,67	44,50	0,90
D3P	13	114,20	110,80	0,97	D3F	14	80,03	75,00	0,94
D3P	28	181,30	184,70	1,02	D3F	28	119,13	112,80	0,95
D3P	43	233,48	221,70	0,95	D3F	43	135,14	133,50	0,99

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento:	927280
Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

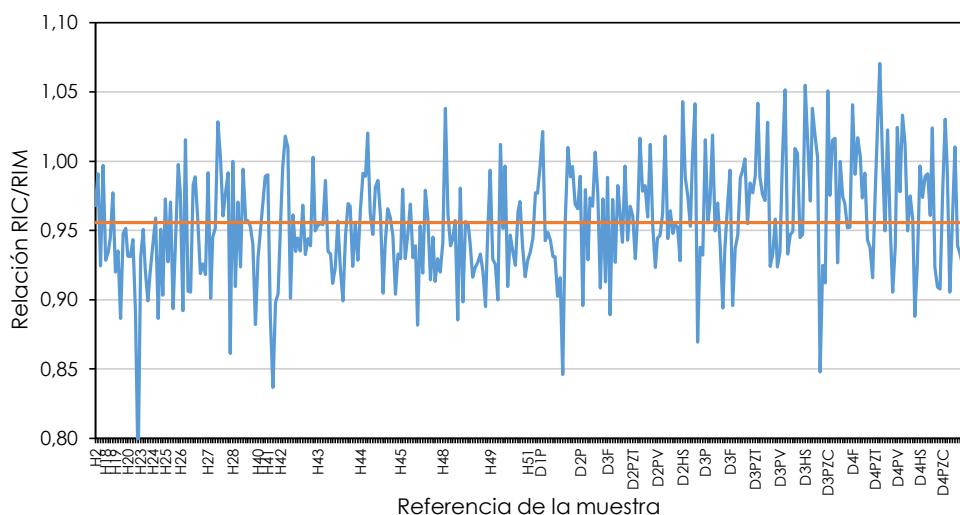
**Tabla 5.10.- (Continuación).**

Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/ RIM	Muestra	Edad (días)	RIM (Ω.m)	RIC (Ω.m)	RIC/ RIM
D3P	64	260,70	252,80	0,97	D3F	55	150,30	149,20	0,99
D3P	91	320,70	301,00	0,94	D3F	84	170,50	170,80	1,00
D3P	116	345,70	309,00	0,89	D3F	126	192,40	183,70	0,95
D3P	146	365,48	342,50	0,94	D3F	152	222,26	218,80	0,98
D3P	215	391,88	379,00	0,97	D3F	184	247,34	241,70	0,98
D3PZT	2	22,44	22,20	0,99	D3PV	3	31,35	29,30	0,93
D3PZT	9	73,43	76,50	1,04	D3PV	8	51,48	51,70	1,00
D3PZT	14	111,54	110,30	0,99	D3PV	16	91,58	96,30	1,05
D3PZT	28	175,89	171,70	0,98	D3PV	28	142,23	132,70	0,93
D3PZT	43	207,90	202,00	0,97	D3PV	44	171,60	162,50	0,95
D3PZT	55	227,40	233,80	1,03	D3PV	54	177,50	168,50	0,95
D3PZT	84	289,30	267,30	0,92	D3PV	91	217,30	219,30	1,01
D3PZT	126	320,20	298,80	0,93	D3PV	120	220,40	221,70	1,01
D3PZT	152	373,40	357,80	0,96	D3PV	146	248,66	235,00	0,95
D3PZT	184	416,46	384,70	0,92	D3PV	178	272,09	257,70	0,95
D3HS	3	34,32	36,20	1,05	D3PZC	3	27,89	29,30	1,05
D3HS	6	62,70	63,50	1,01	D3PZC	8	52,80	51,50	0,98
D3HS	16	283,90	275,70	0,97	D3PZC	16	94,38	95,80	1,02
D3HS	28	468,50	486,30	1,04	D3PZC	28	131,01	133,20	1,02
D3HS	43	699,90	713,00	1,02	D3PZC	44	180,51	167,30	0,93
D3HS	57	850,80	853,30	1,00	D3PZC	54	188,50	188,50	1,00
D3HS	99	2013,60	1707,50	0,85	D3PZC	91	224,50	218,70	0,97
D3HS	125	2695,80	2493,30	0,92	D3PZC	120	225,60	218,70	0,97
D3HS	157	3274,10	2986,70	0,91	D3PZC	146	282,32	268,80	0,95
D3PZC	178	305,75	291,20	0,95					
D4F	3	31,90	33,20	1,04	D4PZT	4	38,70	37,80	0,98
D4F	9	64,80	64,20	0,99	D4PZT	7	52,70	54,30	1,03
D4F	16	118,30	120,30	1,02	D4PZT	14	136,10	145,70	1,07
D4F	28	163,10	163,70	1,00	D4PZT	28	198,10	199,00	1,00
D4F	41	177,70	173,00	0,97	D4PZT	39	240,40	228,30	0,95
D4F	63	215,60	213,70	0,99	D4PZT	61	269,20	275,30	1,02
D4F	92	249,70	235,50	0,94	D4PZT	90	353,20	337,20	0,95
D4F	118	290,60	272,50	0,94	D4PZT	116	420,50	380,80	0,91
D4F	150	323,40	296,20	0,92	D4PZT	148	438,08	411,00	0,94
D4PV	3	32,70	33,50	1,02	D4HS	3	30,10	30,00	1,00
D4PV	9	64,10	62,70	0,98	D4HS	9	123,00	119,80	0,97
D4PV	16	117,10	121,00	1,03	D4HS	16	217,40	215,00	0,99
D4PV	28	159,70	161,70	1,01	D4HS	28	339,10	336,00	0,99
D4PV	41	182,40	173,20	0,95	D4HS	41	403,80	388,00	0,96
D4PV	63	216,20	210,80	0,98	D4HS	63	527,10	539,80	1,02
D4PV	92	237,00	227,00	0,96	D4HS	92	834,20	770,30	0,92

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento:	927280
Código de verificación:	1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 5.10.- (Continuación).**

Muestra	Edad (días)	RIM (O.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM	Muestra	Edad (días)	RIM (O.m)	RIC (Ω.m)	RIC/RIM
D4PV	118	291,40	258,80	0,89	D4HS	118	1077,60	980,00	0,91
D4PV	150	309,21	286,80	0,93	D4HS	150	1241,46	1126,80	0,91
D4PZC	4	38,70	37,80	0,98					
D4PZC	7	52,70	54,30	1,03					
D4PZC	14	113,00	112,30	0,99					
D4PZC	28	173,70	157,30	0,91					
D4PZC	39	178,90	171,20	0,96					
D4PZC	61	219,90	222,20	1,01					
D4PZC	90	266,50	250,20	0,94					
D4PZC	116	305,50	285,00	0,93					
D4PZC	148	328,02	303,30	0,92					

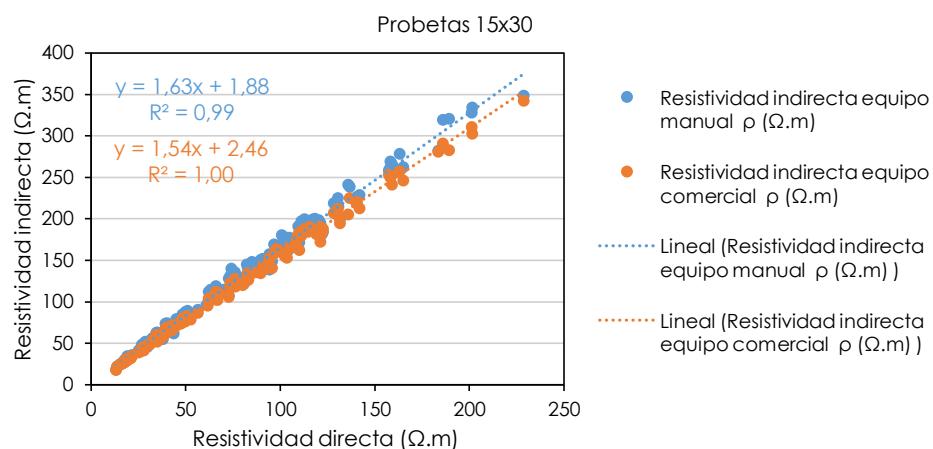
**Figura 5.11.- Relación entre las medidas de resistividad eléctrica por el método indirecto obtenidas con el equipo comercial y con el equipo de fabricación propia en una misma probeta y una misma edad, en diferentes muestras de hormigón y con diferentes tamaños de probetas.**

#### 5.4. Comparativa entre las medidas de resistividad directa e indirecta de hormigones de obra y fabricados en laboratorio.

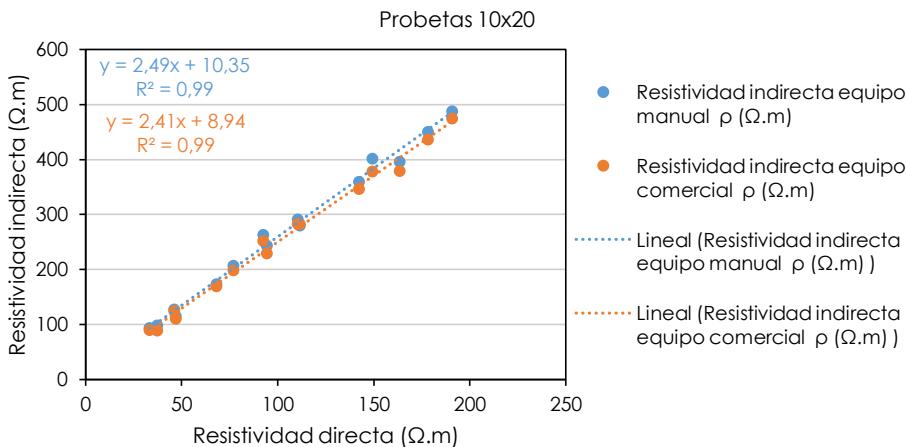
Para las diferentes muestras de hormigón se cuantificó la resistividad eléctrica por el método directo, según la norma UNE 83988-1 [2] mediante el dispositivo descrito en el apartado 3.2.6.1. La resistividad directa es el método de referencia, pero su medida plantea dificultades técnicas que hace que a veces no se pueda realizar si

no se dispone de una fuente de potencial suficientemente potente para muestras de elevada resistividad eléctrica, por lo que la medida mediante el método indirecto facilita el proceso en la mayoría de los casos. Para relacionar la medida indirecta con la directa se hace necesario una constante o factor de forma para los diferentes tamaños de probetas, que se incluye en la constante de celda. Este factor de forma, fue calculado inicialmente por Morris [4] como un coeficiente que dividía al coeficiente de celda. En nuestro caso, a las probetas de 15x30 les corresponde un valor de 1,65, siendo de 2,66 para probetas de 10x20. Esto ha sido posteriormente establecido en la UNE 83988-2 [3] con la diferencia de que es un factor que multiplica a la constante de celda. En nuestro caso se aplicaron los valores de 0,606 para las probetas de 15x30 y de 0,377 para probetas de 10x20.

Si representamos los valores de resistividad indirecta obtenidos con ambos dispositivos frente a la resistividad de referencia medida por el método directo para diferentes muestras de hormigón y a diferentes edades (figuras 5.12 y 5.13), obtenemos buenas correlaciones lineales para las medidas realizadas por ambos dispositivos. Si comparamos las pendientes obtenidas a partir de los ajustes lineales, que representan los factores de forma que corrigen la resistividad indirecta frente a la directa o de referencia (diferente para cada tamaño de probeta), se observa que las medidas realizadas con el dispositivo de fabricación propia se acercan más a los valores calculados por Morris et al. que los obtenidos con el dispositivo comercial. Este hecho es observado para ambos tamaños de probetas.



**Figura 5.12.-** Relación entre las medidas de resistividad indirecta obtenidas con ambos equipos y la resistividad directa o de referencia para probetas de tamaño 15x30 de diferentes muestras de hormigón y edades.



**Figura 5.13.-** Relación entre las medidas de resistividad indirecta obtenidas con ambos equipos y la resistividad directa o de referencia para probetas de tamaño 10x20 de diferentes muestras de hormigón y edades.

#### 5.4.1. Medida de la resistividad directa por el método modificado de las arandelas o abrazaderas.

Esta modificación del método de medida de la resistividad directa mediante arandelas o abrazaderas, nos ha llegado en la recta final de la campaña de ensayos de este trabajo, a través del Servicio de Laboratorios y Calidad de Construcción, ya que ha sido un ensayo introducido como experimental, en la intercomparación de laboratorios a nivel estatal (EILA2016).

En la modificación propuesta del ensayo de resistividad directa, como ya se ha explicado en el apartado 3.2.6.1., se sustituye el uso de los dos multímetros y la fuente, por el uso del equipo comercial de medida de resistividad indirecta y dos abrazaderas colocadas delimitando el tercio central de la altura de la probeta.

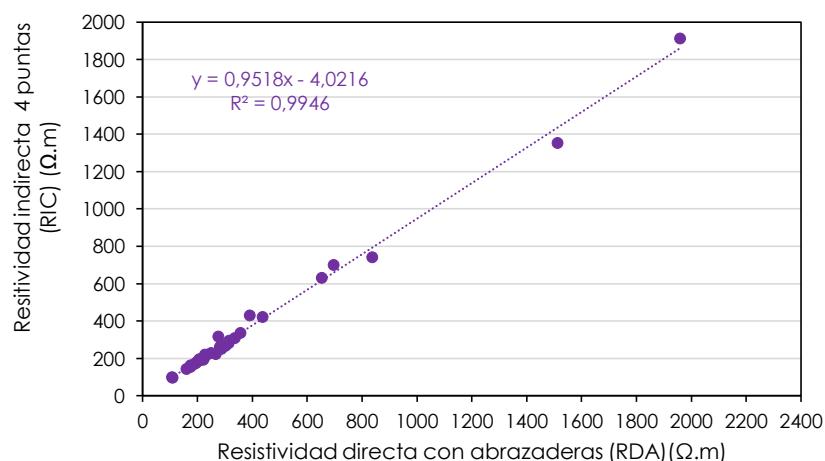
Nos ha parecido interesante realizar este ensayo de resistividad directa alternativa al normativo, a pesar de que se trata de un ensayo puntual, con probetas de edades altas y que no se ha podido repetir a lo largo del tiempo. El ensayo se realizó sobre las diecisiete muestras de hormigones de obra (H) y las diecisiete muestras de hormigones dosificados en laboratorios (D). En la tabla 5.11 se muestran los resultados obtenidos, así como el cálculo del factor de relación entre la resistividad indirecta y la resistividad directa calculada por el método modificado de las arandelas. En la figura 5.14 se representa la correlación entre ambas técnicas para cada una de las muestras analizadas, observándose una muy buena relación lineal

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

entre ambas (índice de regresión de 0,99). En la figura 5.15 se muestra la diferencia cuantitativa entre ambas medidas.

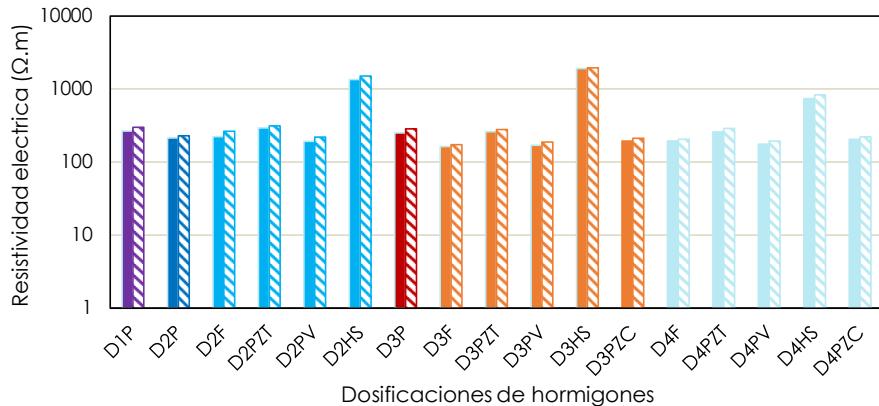
**Tabla 5.11.- Comparativa entre los valores de resistividad calculados por el método indirecto (RIC) y la resistividad directa por el método modificado de las arandelas (RDA).**

Muestra	Curado	RIC	RDA	Relación RDA/RIC	Muestra	Curado	RIC	RDA	Relación RDA/RIC
H2	Balsa	422,0	436,4	1,03	D1P	Balsa	266,5	300,3	1,13
H18	Balsa	183,0	197,2	1,08	D2P	Balsa	214,7	229,7	1,07
H19	Balsa	309,3	334,6	1,08	D2F	Balsa	223,3	265,0	1,19
H20	Cámara	318,5	273,9	0,86	D2PZT	Balsa	294,4	314,2	1,07
H20	Balsa	221,5	225,7	1,02	D2PV	Balsa	192,8	220,4	1,14
H23	Cámara	155,4	174,2	1,12	D2HS	Balsa	1354,4	1511,4	1,12
H23	Balsa	143,1	159,4	1,11	D3P	Balsa	251,2	285,8	1,14
H24	Cámara	98,5	106,6	1,08	D3F	Balsa	163,6	173,6	1,06
H24	Balsa	96,1	108,2	1,13	D3PZT	Balsa	261,2	279,8	1,07
H40	Cámara	429,4	390,1	0,91	D3PV	Balsa	170,2	188,4	1,11
H40	Balsa	337,4	356,4	1,06	D3HS	Balsa	1914,0	1956,9	1,02
H41	Cámara	699,8	695,6	0,99	D3PZC	Balsa	194,6	212,5	1,09
H41	Balsa	630,7	651,4	1,03	D4F	Balsa	194,9	205,9	1,06
H42	Balsa	230,4	248,5	1,08	D4PZT	Balsa	259,4	289,7	1,12
H43	Balsa	193,9	209,9	1,08	D4PV	Balsa	176,3	194,7	1,10
H49	Balsa	280,8	312,8	1,11	D4HS	Balsa	742,4	835,9	1,13
H51	Balsa	269,4	287,8	1,07	D4PZC	Balsa	205,1	221,8	1,08



**Figura 5.14.- Relación entre las medidas de resistividad indirecta con el equipo comercial (RIC) y las obtenidas para la resistividad directa con abrazaderas (RDA).**

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 5.15.- Relación de diagrama de barras entre las medidas de resistividad indirecto equipo comercial (RIC) ■ y las obtenidas para la resistividad directa con abrazaderas (RDA) ▲.**

## 5.5. Conclusiones.

1. Se verifica que la evolución de la resistividad eléctrica tanto para morteros como para hormigones varía con el tiempo siguiendo una ley potencial del tipo  $\rho = a \cdot t^n$ , donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot m$ ),  $t$  el tiempo de exposición (días) y  $a$  y  $n$  constantes. Se observa un rápido aumento de dicho parámetro en los primeros 90 días de curado, estabilizándose posteriormente.
2. Se obtienen menores valores de resistividad eléctrica para los morteros fabricados con cemento tipo CEMII que para los fabricados con cemento CEM IV o puzolánico. La incorporación de las adiciones a los morteros provoca un aumento generalizado de la resistividad eléctrica, produciendo un mayor aumento la adición de humo de sílice, seguida de la adición de puzolana y por último la adición de filler o polvillo de áridos para asfaltos. Esto es debido a las reacciones entre los aluminosilicatos de las puzolanas con el hidróxido de calcio, reacciones que provocan una disminución de la porosidad de las muestras.
3. Los hormigones adicionados con humo de sílice presentan una resistividad eléctrica casi un orden de magnitud superior respecto a los no adicionados.
4. Las muestras curadas en cámara húmeda presentan mayores valores de resistividad respecto a las curadas en balsa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

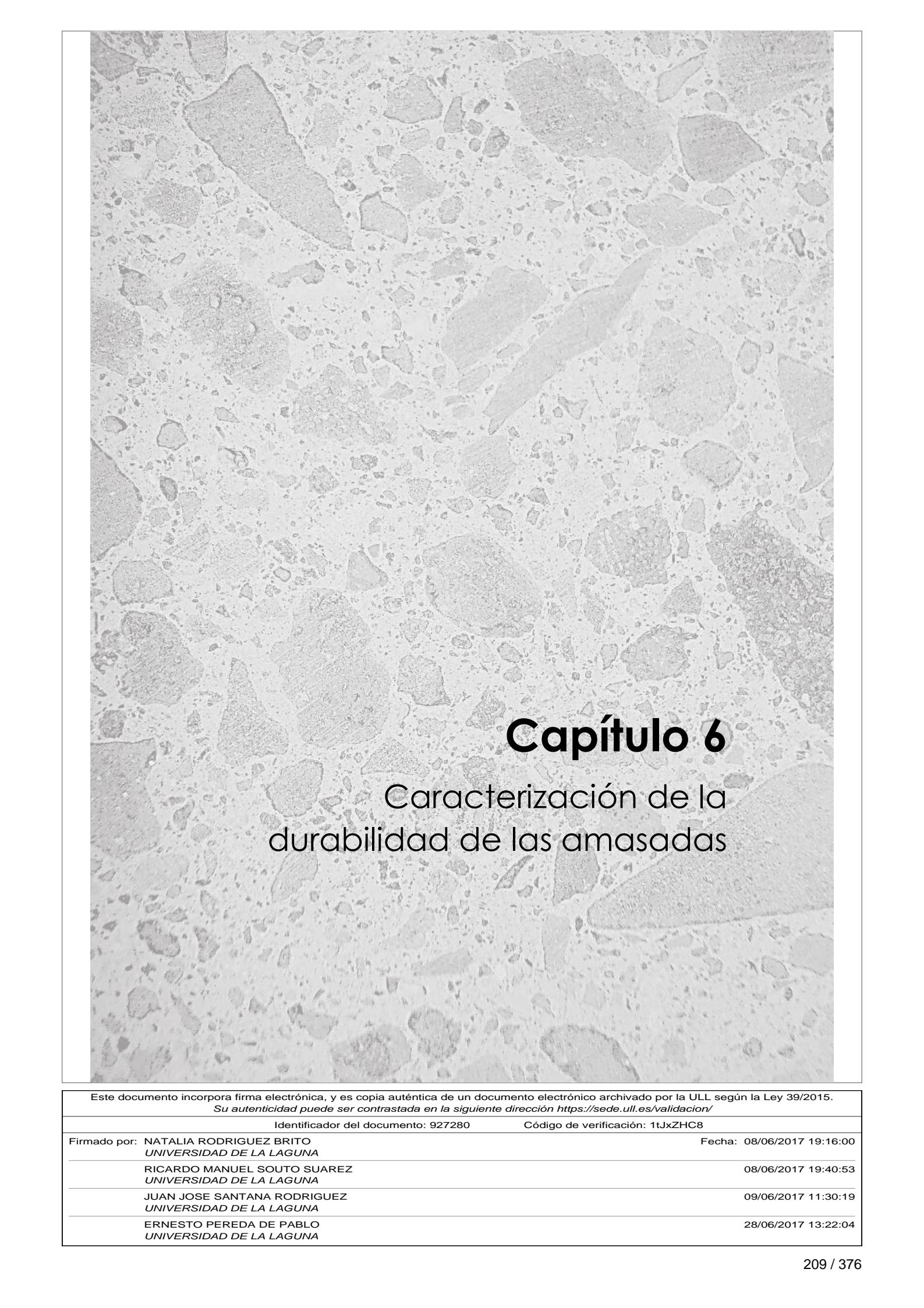
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

5. La dimensión de la probeta no ejerce un efecto determinante en la evolución de la resistividad eléctrica, si bien a mayor diámetro, mayor valor de resistividad.
6. Se ha validado la medida de la resistividad por el método indirecto mediante un equipo de fabricación propia frente a uno comercial, ambos ajustados a norma, obteniéndose unos valores más aproximados a los registrados en la bibliografía con el equipo de fabricación propia.
7. Los valores de resistividad eléctrica medidos tanto por el método indirecto como directo presentan una buena correlación lineal. Se ha introducido el método de medida de la resistividad eléctrica por el método directo de las arandelas o abrazaderas, obteniendo, al igual que en el caso anterior, una muy buena correlación lineal entre esta resistividad y la determinada por el método indirecto.

#### 5.6. Referencias.

- [1] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2. AENOR, Madrid, 2009.
- [2] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia). UNE 83988-1:2008. AENOR, Madrid, 2008.
- [3] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. UNE 83988-2:2008. AENOR, Madrid, 2008.
- [4] W. Morris, E.I. Moreno, Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe, Cem. Concr. Res. 26 (12) (1996) 1779-1787.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



# Capítulo 6

## Caracterización de la durabilidad de las amasadas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS.

### ÍNDICE

<b>6. CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS.....</b>	<b>175</b>
<b>6.1. Introducción .....</b>	<b>175</b>
<b>6.2. Ensayos realizados y tabla resumen de resultados para la comparativa de morteros.....</b>	<b>175</b>
<b>6.3. Resultados y discusión de ensayos para la comparativa de morteros.177</b>	
6.3.1. Ensayos de resistencia a compresión.....	177
6.3.2. Ensayos de porosidad accesible .....	179
6.3.3. Ensayos de resistividad a 28 días .....	180
6.3.4. Ensayos de penetración de cloruros en piscina.....	181
6.3.5. Ensayos de carbonatación .....	183
6.3.6. Discusión general .....	187
<b>6.4. Resultados y discusión de ensayos para la comparativa de durabilidad de las amasadas de hormigón .....</b>	<b>192</b>
6.4.1. Ensayos de resistencia, consistencia y densidades.....	194
6.4.2. Ensayos de porosidad accesible .....	198
6.4.3. Ensayos de penetración de agua .....	200
6.4.4. Ensayos de resistividad eléctrica de las dosificaciones de laboratorio .....	200

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

6.4.4.1. Resistividad eléctrica. Método directo a los 28 días .....	200
6.4.4.2. Resistividad eléctrica. Comparativa de los tres métodos de resistividad.....	202
6.4.5. Ensayos de carbonatación .....	203
6.4.5.1. Ensayos de carbonatación natural. Método B.....	204
6.4.5.2. Ensayos de carbonatación. Método acelerado.....	205
6.4.6. Medida de la penetración de cloruros.....	207
6.4.6.1. Inmersión en piscina .....	207
6.4.6.2. Método multirregimen.....	211
6.4.6.3. Método integral acelerado .....	214
6.4.7. Relación entre ensayos.....	215
<b>6.5. Conclusiones .....</b>	<b>221</b>
<b>6.6. Referencias .....</b>	<b>224</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Firmado por:	Identificador del documento:	Código de verificación:	Fecha:
NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	927280	1tJxZHC8	08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA			28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 6 – CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS.

### 6.1. Introducción.

En este capítulo se estudian diferentes dosificaciones de morteros y hormigones a las que se les han añadido distintos materiales como adiciones en sustitución de un porcentaje del cemento. Las muestras han sido dosificadas y amasadas en laboratorio, con el objeto de reproducir morteros y hormigones de obra. El objetivo es una mejora en la durabilidad del hormigón al ser adicionado con estos materiales o, si esto no es posible, investigar la posibilidad de reciclar dichos materiales usándolos como un árido superfino que no perjudiquen la durabilidad de morteros y hormigones. Según vimos en el capítulo 3, las adiciones propuestas son el filler, puzolana de toba, polvo de pulir, puzolana de cantera y humo de sílice.

En este capítulo se exponen los resultados de la metodología experimental realizada, que ya fue descrita en el capítulo 3, relacionando los resultados de las principales variables características de los morteros y hormigones. El apartado 6.2 está dedicado a los morteros y el 6.3 a los hormigones.

### 6.2. Ensayos realizados y tabla resumen de resultados para la comparativa de morteros.

Los ensayos planteados para relacionar las distintas propiedades de los morteros, así como la influencia de las adiciones realizadas, son:

- Determinación de las resistencias mecánicas a flexión y compresión, según la UNE-EN 1015-11 [1].
- Resistividad eléctrica por el método de Wenner relacionado con el tiempo, según la UNE 83988-2 [2].
- Porosidad accesible al agua, según la UNE 83980 [3].
- Medida de la penetración de cloruros a través del dispositivo “Piscina” según PrUNE 83986:2009 [4], CEN TS 12390-11:2009 [5] y determinación de cloruros en hormigón endurecido UNE-EN 14629: 2007 [6].
- Medida de la carbonatación a 6 meses, 1 año y dos años, según UNE-EN 83993-1:2009 [7] y UNE 112011:94 [8] y 2011 [9].

En la tabla 6.1 se indican los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre las muestras de mortero, codificados según se ha descrito en el apartado 3.1.5.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.1.-** Resultados experimentales de los ensayos realizados a los morteros.

Código de la muestra	Resistencia a flexión a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión a los 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	Resistividad eléctrica (Ω.m)	Porosidad media a los 28 días (%)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Profundidad de penetración de Cl- (mm)	Velocidad de penetración de Cl- [(mm/(año))]	Profundidad de penetración de CO <sub>2</sub> (días)	Velocidad de penetración de CO <sub>2</sub> [(mm/(año))]	Profundidad de exposición de CO <sub>2</sub> (días)	Tiempo de exposición de CO <sub>2</sub> (días)	Velocidad de penetración de CO <sub>2</sub> [(mm/año)]
M1ANP	10,13	54,00	4,60	21,81	2010	10	20,14	204	2,46	3,29	368	1,95
M1ANPZ	9,12	44,68	9,92	24,06	1980	9	18,12	202	2,49	3,34	366	3,19
M1ANF	7,87	39,40	4,86	23,21	1960	11	22,15	187	2,45	3,42	371	3,40
M1ANHS	7,02	32,64	13,53	24,86	1870	9	18,12	180	3,02	4,30	362	3,56
M1ASP	7,42	47,42	3,72	25,54	1740	13	26,18	182	2,50	3,54	366	3,31
M1ASPTI	8,04	43,49	5,94	26,12	1780	10	20,03	182	2,98	4,22	366	4,25
M1ASF	8,15	41,86	4,63	30,78	1910	13	26,18	182	2,74	3,89	365	3,25
M1ASHS	6,72	42,34	9,43	28,49	1890	17	34,24	180	2,86	4,07	363	3,28
M2ANP	9,87	39,41	13,98	23,24	1890	6	10,08	204	3,24	4,33	368	4,04
M2ANPZ	7,70	35,98	18,12	25,87	1910	6	12,08	202	4,45	5,96	367	6,02
M2ANF	8,79	27,75	15,06	24,90	1960	7	14,10	187	4,29	6,00	371	6,30
M2ANHS	7,28	27,40	33,48	25,34	1850	5	10,07	180	4,59	6,54	362	5,67
M2ASP	8,73	36,61	7,49	29,29	1900	12	24,17	182	4,48	6,35	366	5,97
M2ASPTI	6,55	28,41	10,03	28,35	1620	9	18,02	182	5,22	7,39	366	7,31
M2ASF	6,97	29,11	7,46	30,74	1890	10	20,14	182	5,25	7,43	365	7,16
M2ASHS	6,91	33,63	30,21	29,39	1870	16	32,22	180	7,40	10,53	363	6,97

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

09/06/2017 11:30:19

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/06/2017 13:22:04

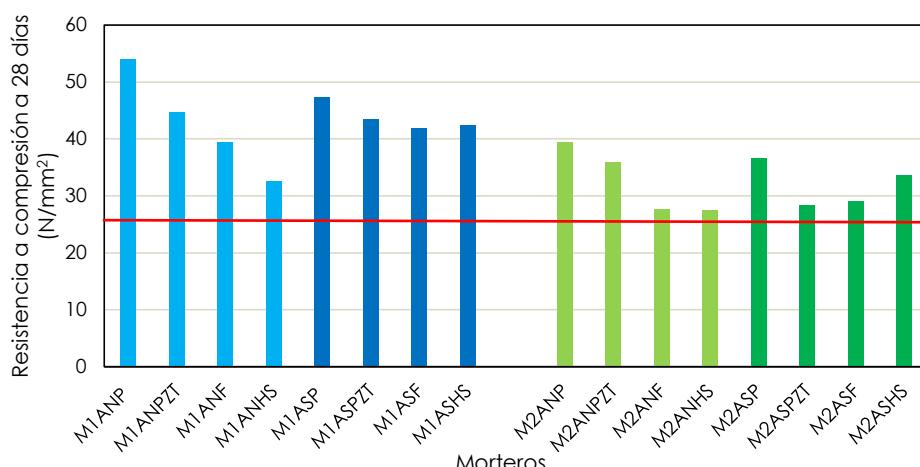
### 6.3. Resultados y discusión de los ensayos para la comparativa de morteros.

Los morteros se fabricaron con la idea de conocer, mediante ensayos previos, la influencia de varios componentes tales como el tipo de árido, el tipo de cemento, y una variedad de adiciones que sustituyen al cemento en un 20%, en el valor de las principales variables características de los mismos, con el objeto de detectar cual es el efecto de cada adición respecto a las amasadas patrón sin adiciones.

Par facilitar la exposición y discusión de los resultados, las figuras con los resultados incluyen gráficas de barras, representando de color azul las muestras de mortero M1, fabricado con cemento CEM II y con color verde las muestras de mortero M2, fabricado con cemento CEM IV. Asimismo, dentro de cada color, distinguimos de color claro los morteros fabricados con arena normalizada (AN) y con color más oscuro los morteros fabricados con arena ensacada (AS).

#### 6.3.1. Ensayos de resistencia a compresión.

El ensayo de resistencia a compresión a los 28 días, descrito en el apartado 3.2.1, es el ensayo más característico para la identificación de un mortero. En la figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos para las muestras de mortero analizadas. Se ha incluido una línea horizontal roja que marca el límite superior de resistencia para los distintos usos, tomando en consideración que las prescripciones de resistencia de los morteros de albañilería se clasifican por la letra M seguido de la resistencia en N/mm<sup>2</sup>, en un rango que abarca del M-1 a Md>25 N/mm<sup>2</sup>.



**Figura 6.1.-** Resultados de resistencia a compresión a 28 días de morteros.

A raíz de los resultados obtenidos se encuentra que las adiciones provocan una reducción en la resistencia a la compresión en todas las muestras de mortero analizadas. En la tabla 6.2 se muestran los porcentajes de disminución de la resistencia en función del tipo de mortero y adición.

**Tabla 6.2.-** Porcentajes de disminución de la resistencia de los morteros con adiciones respecto a los morteros patrón.

Resistencia media a compresión a los 28 días de los morteros patrón (N/mm <sup>2</sup> )	Porcentaje de disminución de resistencia de los morteros con adiciones (%)		
M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS
54,00	17,26	27,04	39,56
M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS
47,42	8,29	11,73	10,71
M2ANP	M2ANPZT	M2ANF	M2ANHS
39,41	8,70	29,59	30,47
M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS
36,61	22,40	20,49	8,14

Todos los morteros fabricados con la dosificación tipo cumplen para la máxima resistencia a compresión exigida de morteros de albañilería Md ( $>25\text{ N/mm}^2$ ) y por tanto su uso puede abarcar desde morteros para tabiquería y particiones (M-5), fábricas vistas (M-7,5), fábricas resistentes armadas y no armadas (M-7,5), fábricas de alta resistencia, solados para baldosas cerámicas, cementosas, etc.

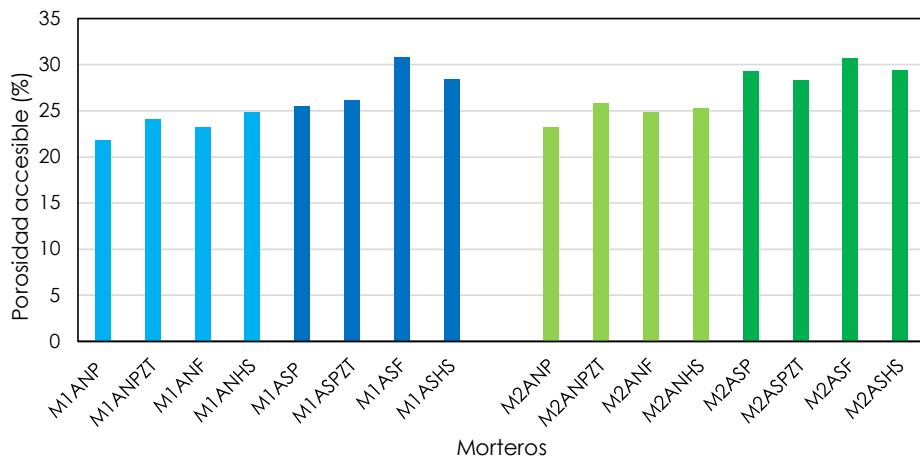
De los resultados representados en la figura 6.1 se aprecia que todos los morteros fabricados con CEM II/A-P/42,5R (color azul) tienen mayores valores de resistencia que los fabricados con CEM IV/A-P/32,5N (color verde). También se observa un mayor valor de resistencia a compresión para las muestras patrón (M1ANP, M1ASP, M2ANP, M2ASP) en comparación con los morteros con adiciones. Todas las adiciones provocan una disminución en el valor de la resistencia a compresión. La adición que mejor comportamiento exhibe es la puzolana de toba, con disminuciones de resistencia que oscilan entre el 8% y el 22%, mientras que la disminución de resistencia con las restantes adiciones es más acusada (tabla 6.2). Para todos los casos estudiados, las adiciones proporcionan valores de resistencia a compresión superiores a los valores máximos exigidos para morteros de albañilería.

No se observa gran diferencia entre el uso de un árido normalizado respecto al empleo de un árido ensacado de una cantera canaria, con una disminución del 12% en el caso del M1ASP con respecto al M1AN y del 7% en el caso del mortero M2ASP con respecto al M2ANP.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

### 6.3.2. Ensayos de porosidad accesible.

El ensayo de porosidad accesible al agua en mortero nos da una idea de cuan sensible es el mortero a los distintos agresivos ambientales. En la figura 6.2 se representan los resultados experimentales de porosidad.



**Figura 6.2.-** Resultados de la porosidad accesible al agua de morteros.

En la tabla 6.3 se muestran los porcentajes de variación de la porosidad en función del tipo de adición realizada.

**Tabla 6.3.-** Porcentajes de variación de la porosidad de los morteros con adiciones respecto a los morteros patrón.

Porosidad accesible de los morteros patrón (%)	Porcentaje de variación de la porosidad de los morteros con adición (%)		
M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS
21,81	10,32	6,42	13,98
M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS
25,54	2,27	20,52	11,55
M2ANP	M2ANPZT	M2ANF	M2ANHS
23,24	11,32	7,14	9,04
M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS
29,29	-3,21	4,95	0,34

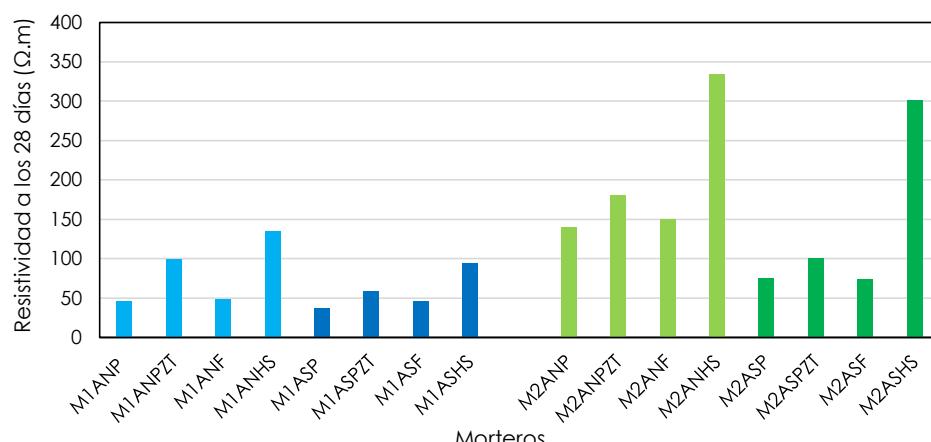
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

En función de los resultados obtenidos se observa que el tipo de árido utilizado influye en la porosidad de la muestra. La porosidad de los morteros fabricados con la arena ensacada canaria siempre es mayor que los fabricados con la arena normalizada (color claro), lo cual sucede tanto para los morteros fabricados con el CEM II (azul) como para los fabricados con el CEM IV (verde).

Los resultados de porosidad de los morteros con adiciones arrojan un incremento de la porosidad de forma casi genérica respecto a las correspondientes amasadas patrón, excepto en el caso de M2ASPZT, en la que disminuye. A partir de los datos de la tabla 6.3, de entre las muestras ensayadas, los casos en los que menos ha aumentado la porosidad respecto a las amasadas patrón se corresponden con las muestras de mortero M1ASPZT y M2ASHS, con unos porcentajes de variación respecto al patrón de entre un 0 y un 2%, dándose el caso de mayor aumento de la porosidad en el M1ASF en un 20%.

### 6.3.3. Ensayos de resistividad a 28 días.

El ensayo de resistividad a 28 días, realizado por el método de las cuatro puntas o de Wenner con el equipo de fabricación propia, descrito en el apartado 3.2.6.2, es un indicativo de la resistencia y de la porosidad de los morteros.



**Figura 6.3.-** Resultados de resistividad de morteros a los 28 días.

De la figura 6.3 se observa que la resistividad a los 28 días aumenta para todas las formulaciones con adiciones con respecto a la probeta patrón. En la tabla 6.4 se muestran los porcentajes de variación de la resistividad en función del tipo de adición efectuada.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.4.** - Porcentajes de variación de la resistividad de los morteros con adiciones respecto de los morteros patrón.

Resistividad media a los 28 días de los morteros patrón ( $\Omega \cdot m$ )	Porcentaje de variación de la resistividad de los morteros con adiciones (%)		
M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS
46,01	115,55	5,57	194,03
M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS
37,13	60,04	24,62	154,06
M2ANP	M2ANPZ	M2ANF	M2ANHS
139,75	29,65	7,72	139,56
M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS
74,90	33,91	-0,47	303,22

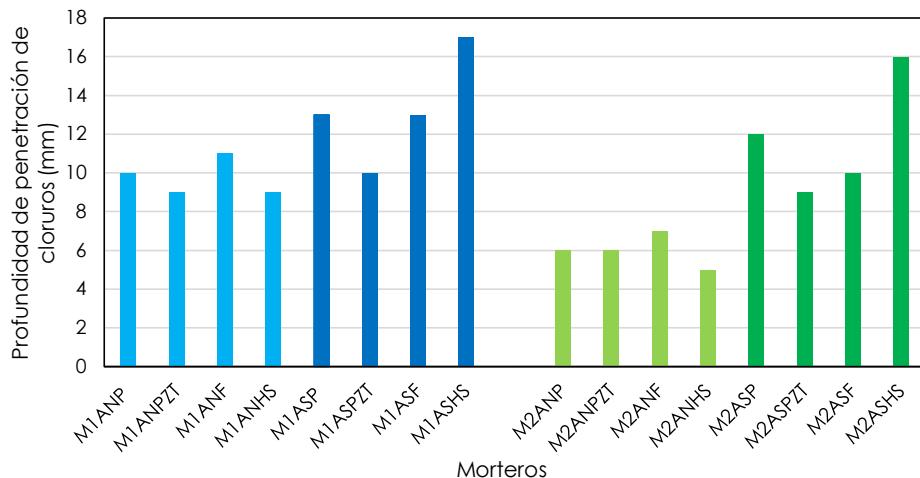
La adición que más afecta al aumento de la resistividad es el humo de sílice, el cual provoca aumentos en el valor que van desde tres a cuatro veces el valor inicial de resistividad de la muestra. En segundo lugar, se encuentra la puzolana de toba con aumentos de hasta el 115% y, por último, el filler, modificando el valor de resistividad entre un 0% y un 24%.

Respecto al efecto que ejercen los dos cementos estudiados, de forma genérica se ve que los morteros M2, fabricados con el cemento CEM IV (color verde), dan valores mayores de resistividad, respecto a los fabricados con CEM II, los morteros M2 (color azul).

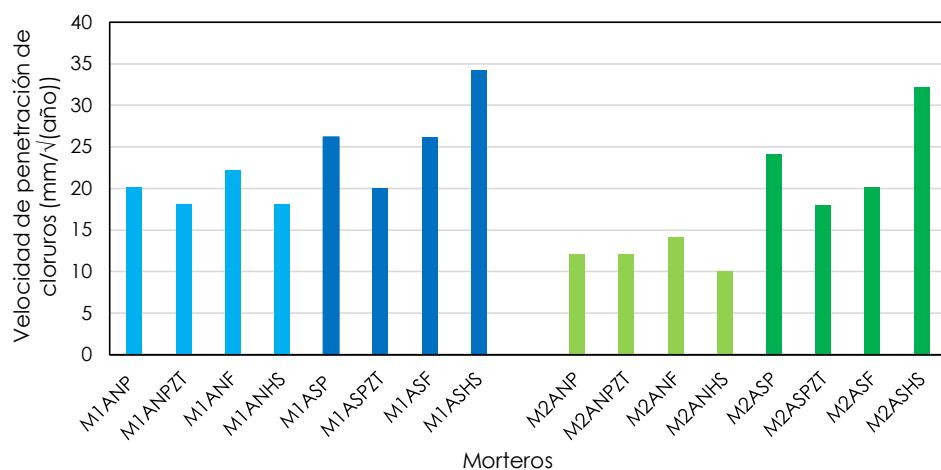
#### 6.3.4. Ensayos de penetración de cloruros en piscina.

El ensayo de penetración de cloruros en piscina, descrito en el apartado 3.2.10.1, nos informa de la profundidad que alcanzan los cloruros en el mortero y de su velocidad de difusión. Como valor de profundidad de penetración en el mortero se ha considerado como concentración crítica un valor igual a 0,4% en peso del cemento. En las figuras 6.4 y 6.5 se muestran los resultados experimentales obtenidos tras una exposición de cloruros a 90 días en piscina.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.4.-** Resultados de penetración de cloruros en morteros expuestos en dispositivo de piscina.



**Figura 6.5.-** Resultados de velocidad de penetración de cloruros en morteros expuestos en dispositivo de piscina.

Los resultados de penetración de cloruros en los morteros muestran resultados dispares en función del tipo de adición efectuada. En la tabla 6.5 se muestra el porcentaje de variación de ambas variables respecto a los valores observados en la probeta patrón.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.5.-** Porcentajes de variación de la velocidad de penetración de cloruros en los morteros con adiciones respecto de los morteros patrón.

Velocidad de penetración de cloruros (mm/ $\sqrt{\text{año}}$ )	Porcentaje de variación de la velocidad de penetración de cloruros (%)		
M1ANP 20,14	M1ANPZT -10,00	M1ANF 10,00	M1ANHS -10,00
M1ASP 26,18	M1ASPZT -23,08	M1ASF 0	M1ASHS 30,77
M2ANP 18,08	M2ANPZT 0	M2ANF 16,67	M2ANHS -16,67
M2ASP 24,17	M2ASPZT -25	M2ASF -16,67	M2ASHS 33,33

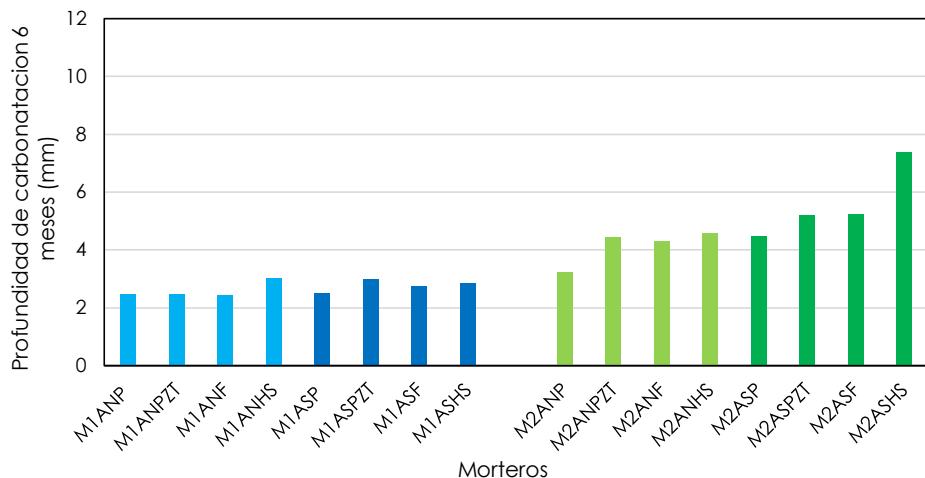
En términos generales los resultados de profundidad y velocidad de penetración de cloruros en las probetas patrón nos indican que varían tanto en función del mortero como del árido empleado. Se observa que los morteros M-1, fabricados con el CEM II, presentan mayores niveles de penetración de cloruros con respecto a los morteros M2, fabricados con el CEM IV. En ambos tipos de mortero M-1 y M-2, también se confirma que hay una mayor penetración de cloruros y velocidad de avance en aquellos fabricados con arena ensacada que con arena normalizada.

Teniendo en cuenta el parámetro de la arena, nos encontramos que en el caso de la arena normalizada dos de las adiciones mejoran los resultados disminuyendo la profundidad de penetración y la velocidad, correspondiéndose con la puzolana, que hace disminuir dichos valores en torno a un 10% y en mayor medida el humo de sílice que afecta entre un 10% y un 16%. En los morteros formulados con arena ensacada no se observa este mismo comportamiento, ya que sólo los morteros con adición de puzolana mejoran los resultados respecto de las amasadas patrón en un 23 y 25%.

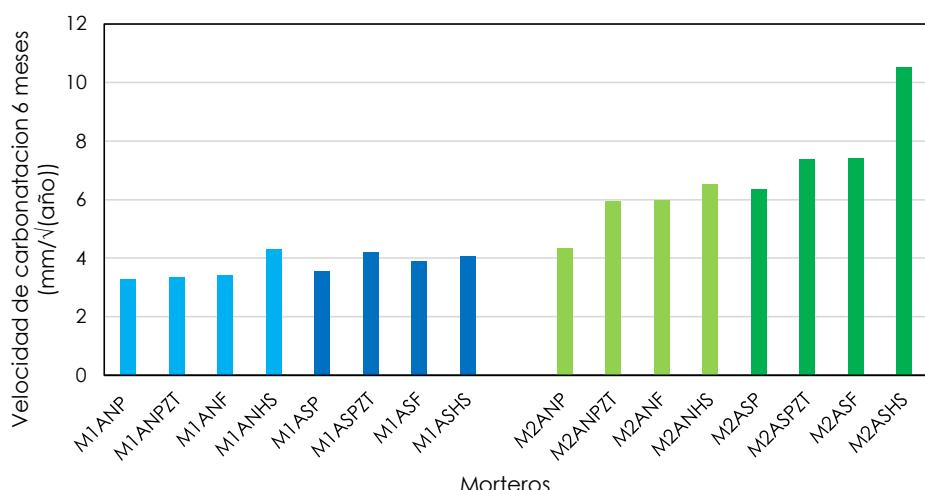
Respecto a las distintas adiciones, destacar que la adición de puzolana proporciona una mejora en todos los tipos de morteros, excepto en el M2AN que no se ve afectado.

### 6.3.5. Ensayos de carbonatación.

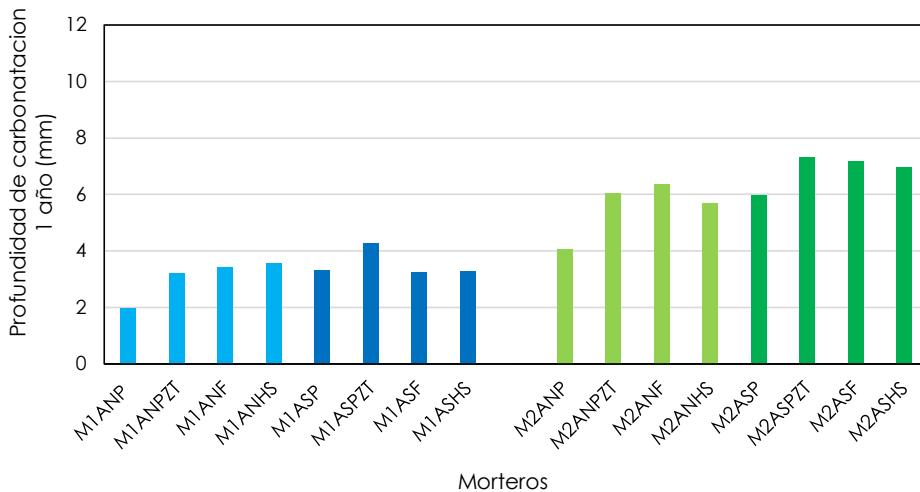
El ensayo de carbonatación nos informa de la profundidad de penetración del CO<sub>2</sub> (frente de carbonatación) en las probetas, así como de su velocidad de avance. En las figuras 6.6 a 6.9 se muestran los resultados experimentales obtenidos tras una exposición a carbonatación natural (ambiente B) durante 6 meses y un año, descritos en el apartado 3.2.9.1.



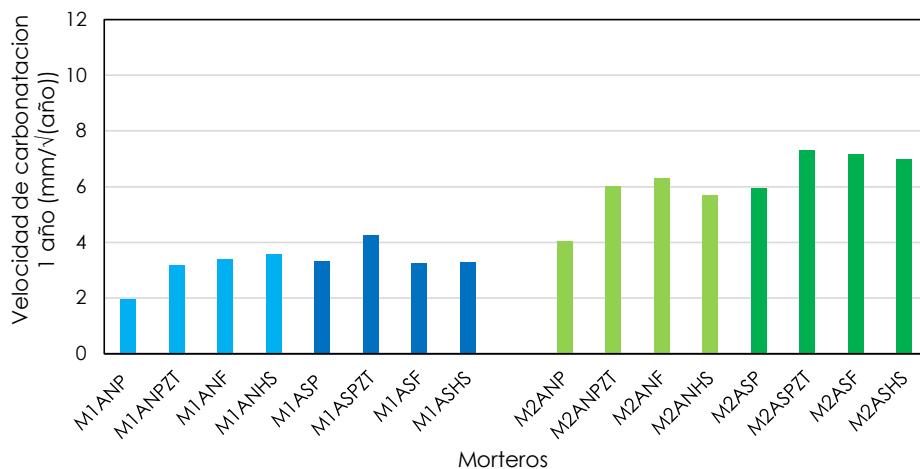
**Figura 6.6.-** Resultados de profundidad de carbonatación a 6 meses en morteros expuestos en condiciones naturales.



**Figura 6.7.-** Resultados de velocidad de penetración de carbonatación a 6 meses en morteros expuestos en condiciones naturales.



**Figura 6.8.-** Resultados de profundidad de carbonatación a 1 año en morteros expuestos en condiciones naturales.



**Figura 6.9.-** Resultados de velocidad de penetración de carbonatación a 1 año en morteros expuestos en condiciones naturales.

En las tablas 6.6 y 6.7 se muestran los porcentajes de variación de la velocidad de penetración de la carbonatación para cada probeta adicionada con respecto a las probetas patrón.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.6.-** Porcentajes de variación de la profundidad y velocidad de penetración de la carbonatación a 6 meses de exposición, en los morteros con adiciones respecto de los morteros patrón.

Profundidad media de penetración a 6 meses (mm)	Variación de la profundidad de penetración de la carbonatación a 6 meses (%)				Velocidad de penetración, avance a 6 meses (mm/√(año))	Variación de la velocidad de penetración de la carbonatación a 6 meses (%)			
M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS	M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS		
2,46	1,22	-0,41	22,76	3,29	1,52	3,95	30,70		
M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS	M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS		
2,50	19,20	9,60	14,40	3,54	19,21	9,89	14,97		
M2ANP	M2ANPZ	M2ANF	M2ANHS	M2ANP	M2ANPZ	M2ANF	M2ANHS		
3,24	37,35	32,41	41,67	4,33	37,64	38,57	51,04		
M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS	M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS		
4,48	16,52	17,19	65,22	6,35	16,38	17,01	65,83		

**Tabla 6.7.-** Porcentajes de variación de la profundidad y velocidad de penetración de la carbonatación a 1 año de exposición, en los morteros con adiciones respecto de los morteros patrón.

Profundidad media de penetración a 1 año (mm)	Variación de la profundidad de penetración de la carbonatación a 1 año (%)				Velocidad de penetración, avance a 1 año (mm/√(año))	Variación de la velocidad de penetración de la carbonatación a 1 año (%)			
M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS	M1ANP	M1ANPZT	M1ANF	M1ANHS		
1,95	63,59	75,90	82,56	1,95	63,59	74,36	83,08		
M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS	M1ASP	M1ASPZT	M1ASF	M1ASHS		
3,32	28,01	-2,11	-1,20	3,31	28,40	-1,81	-0,91		
M2ANP	M2ANPZ	M2ANF	M2ANHS	M2ANP	M2ANPZ	M2ANF	M2ANHS		
4,06	48,77	56,65	39,66	4,04	49,01	55,94	41,09		
M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS	M2ASP	M2ASPZT	M2ASF	M2ASHS		
5,97	22,61	19,93	16,75	5,96	22,65	20,13	17,28		

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

De las figuras 6.7 y 6.9 se desprende que la velocidad de avance del frente de carbonatación se reduce con el tiempo de exposición, es decir, que la carbonatación en los 6 primeros meses avanza más rápidamente que en los seis siguientes hasta completar el año.

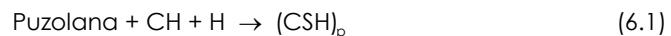
La velocidad de carbonatación de la muestra se ve afectada por el tipo de cemento y el tipo de árido empleado. De forma general, la carbonatación en las muestras patrón formuladas con CEM II (los morteros M-1) han resultado tener una carbonatación inferior a las muestras con CEM IV (los morteros M2). A su vez, los morteros formulados con árido ensacado canario presentan un mayor frente de carbonatación que las muestras fabricadas con árido normalizado.

En relación a los resultados de las muestras con adiciones, todas las muestras han empeorado su comportamiento respecto a los morteros patrón, aumentando tanto la profundidad de penetración como la velocidad de avance del frente de carbonatación.

### 6.3.6. Discusión general.

Para entender el efecto que ejercen las distintas adiciones sobre los morteros preparados tenemos que tener en cuenta cuál es el papel que juegan dichos materiales en las reacciones involucradas con el cemento.

La denominada reacción puzolánica, tal y como se comentó en el capítulo 2, es principalmente la que se da entre el óxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ), la cal o hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ , conocido como portlandita, en adelante CH) y el agua (en adelante H), para producir silicatos de calcio hidratados (en adelante CSH).



Es una reacción equivalente a la que se da en el cemento Portland y se obtiene un producto muy similar. Como productos principales se produce CSH y CH, además de otros subproductos. Mientras que el CSH podría definirse como el "pegamento" del cemento y principal responsable de su resistencia e impermeabilidad, el CH no tiene valor cementante y se disuelve fácilmente en medios agresivos. La principal aportación de este compuesto es la de mantener un ambiente alcalino (pH alto) que ayuda a proteger de la corrosión las armaduras en el hormigón armado. Más concretamente, la puzolana de toba, da positivo en cuanto a su índice de actividad puzolánica, ya descrito en el apartado 3.1.3.5. y el resto de adiciones poseen un índice de actividad resistente (IAR) superior al requerido, como se puede ver en la posterior tabla 6.11 y figura 6.13.

Las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan, principalmente, de tres características de la reacción puzolánica y que se pueden resumir en:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

- es una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos.
- es una reacción que consume hidróxido de calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.
- al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción llenan, de forma muy eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento. Así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánica del sistema (menor porosidad).

En la tabla 6.8 se resumen los resultados obtenidos en los distintos ensayos por las distintas amasadas de mortero adicionadas en comparación con las amasadas de mortero patrón. Las flechas nos indican el sentido de aumento o disminución del valor y el color rojo indica empeoramiento y el verde mejora.

**Tabla 6.8.-** Efecto de las adiciones en las amasadas dosificadas de morteros respecto a su respectiva dosificación patrón.

	CEM II						CEM IV					
	AN			AS			AN			AS		
	PZT	F	HS	PZT	F	HS	PZT	F	HS	PZT	F	HS
Resistencia a la compresión	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Porosidad	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Resistividad	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑
V Penetración cloruros	↓	↑	↓	↓	=	↑	=	↑	↓	↓	↓	↑
Carbonatación (6 meses)	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Carbonatación (1 año)	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑

La forma más común de designar los morteros es conforme a su resistencia. Tanto los morteros de albañilería diseñados como prescritos se clasifican a partir de su resistencia a compresión, identificándose por la letra M seguido de la resistencia en N/mm<sup>2</sup>, en un rango que abarca del M-1 al M>25 N/mm<sup>2</sup>, tal y como se indica en la norma UNE EN 998-2 [10].

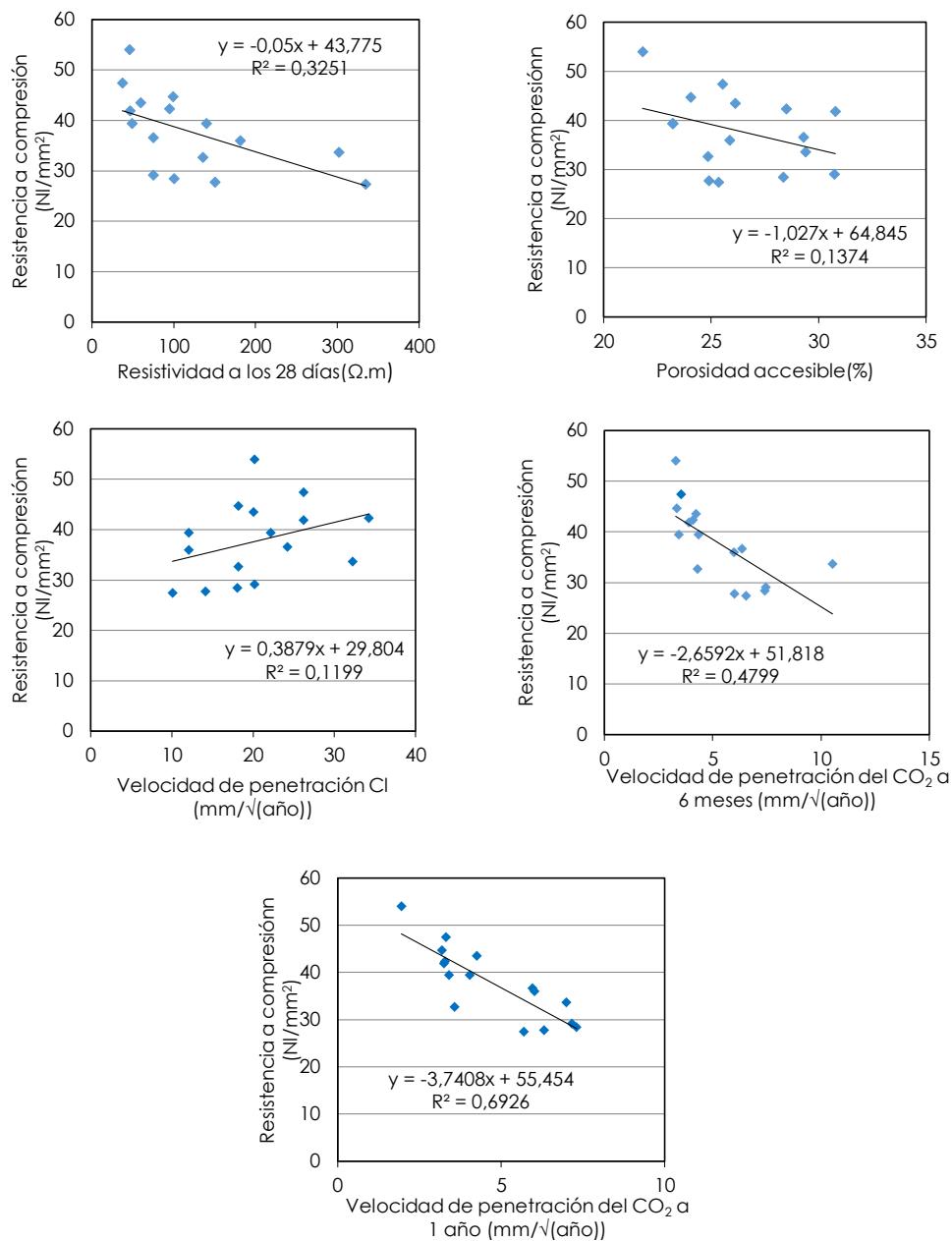
Los morteros de albañilería en fábricas se pueden aplicar en tabiquería de interior y particiones (M-5), para cerramientos tanto de fábrica no resistente revestida, como con cerramientos de fábrica vista (M-5 y M-7,5), fábrica resistente no armada y armada (M-7,5) y fábrica de alta resistencia (>M-10). En cuanto a morteros de albañilería para solados, para la aplicación de pieza a pieza (M-7,5 y M-10), extensión simple a solados de baja intensidad de tráfico (M-2,5) y de media y alta intensidad

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	

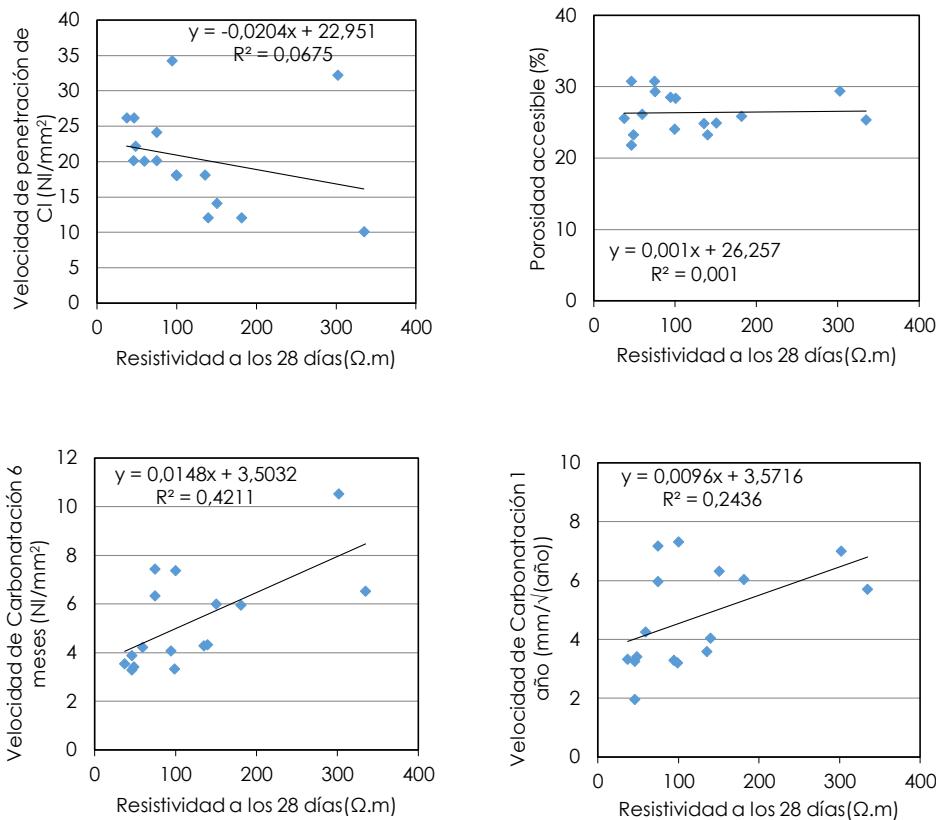
(M-5). Y extensión de piezas con adhesivos cementosos (M-7,5) y no cementosos (M-7,5 y M-10).

El efecto de la incorporación de las adiciones, desde el punto de vista mecánico, si bien no mejoran sus resistencias, hace que adopten valores de resistencia a la compresión superiores al máximo establecido para cualquier uso ( $M_d > 25$ ) (tabla 6.2 y figura 6.1). Por lo tanto, es factible el uso de las adiciones propuestas en la presente tesis para la elaboración de morteros con CEM II y CEM IV, pudiendo ser empleados éstos para cualquier uso de los recogidos en la UNE EN 998-2.

Desde el punto de vista de la mejora de las propiedades de las dosificaciones adicionadas con respecto de la probeta patrón, destacar que de forma general sólo se ven mejoradas la resistividad eléctrica y la penetración de cloruros. En las figuras 6.10 y 6.11 se ha intentado establecer relaciones entre las distintas variables que caracterizan el comportamiento de un mortero, como son la porosidad accesible, la resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, la velocidad de penetración de carbonatación y de cloruros.



**Figura 6.10.-** Relaciones entre la resistencia a compresión y el resto de variables estudiadas que caracterizan el comportamiento de un mortero.



**Figura 6.11.- Relaciones entre la resistividad y el resto de variables estudiadas que caracterizan el comportamiento de un mortero.**

De las figuras anteriores no se observa ninguna correlación relevante, excepto en el caso de la carbonatación a 6 meses y 1 año con respecto a la resistencia a compresión, y en menor medida con respecto a la resistividad eléctrica.

#### **6.4. Resultados y discusión de ensayo para la comparativa de durabilidad de las amasadas de hormigones.**

En el presente apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos al ensayar diferentes amasadas de hormigón de las que se han fabricado probetas de distinta forma geométrica, las cuales han sido sometidas a ensayos de laboratorio y de exposición natural. Todos los hormigones fueron elaborados con áridos y cementos de amplio uso en Canarias, por lo que son dosificaciones representativas del tipo de hormigón empleado en Canarias en el mundo de la construcción. Como ya se ha expuesto en el capítulo 3, las probetas han sido fabricadas y curadas según lo establece la normativa vigente.

En la tabla 6.9 se indican los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre las muestras de hormigones dosificadas en laboratorio, codificados según se ha descrito en el apartado 3.1.6.

Dada la variabilidad de muestras ensayadas, y en aras de ofrecer una exposición clara tanto de resultados como de discusión de los mismos, todos los aspectos relacionados con las dosificaciones del hormigón han sido recogidas en detalle en el anexo II de la presente tesis, tal y como se expuso en el capítulo 3. Todas las probetas de hormigón, han sido dosificadas, amasadas y curadas en laboratorio. A continuación, se resume la codificación, identificación y principal característica de cada dosificación de hormigón ensayada:

- D1P (representado en todas las gráficas en color malva), HA-35/S/20/IIla, es la dosificación de un hormigón de gran durabilidad que se ha tomado como referencia y que cumple sobradamente con los parámetros de la instrucción vigente. A esta dosificación no se le incorporaron las adiciones de esta tesis.
- D2P (representado en todas las gráficas en color azul oscuro), HA-25/F/20/IIla, se trata de un hormigón de baja durabilidad ante fuentes agresivas debido a la dosificación de una cantidad de cemento mínima, no uso de superplastificantes y una alta relación agua/cemento.
- D3P (representado en todas las gráficas en color marrón), HA-30/F/20/IIla, se presenta como una mejora del hormigón D2P, donde se ha mantenido la cantidad de cemento y se ha reducido la relación agua/cemento con la introducción de superplastificantes.
- Las dosificaciones D2 y D3 han sido adicionadas con distintos materiales en un porcentaje del 20% en peso del cemento. Los materiales adicionados en las dosificaciones son filler (F), polvo de pulir (PV), puzolana de toba (PZT), puzolana de cantera (PZC) y humo de sílice (HS). El peso de estos materiales se resta a la cantidad de cemento.
- Las amasadas adicionadas D4 (representado en todas las gráficas en color azul claro), que tienen como patrón la dosificación D2P, es decir, que son una modificación de la amasada en las que el 20% adicionado no se ha restado a la cantidad de cemento sino se ha introducido como si fuese una arena superfina.

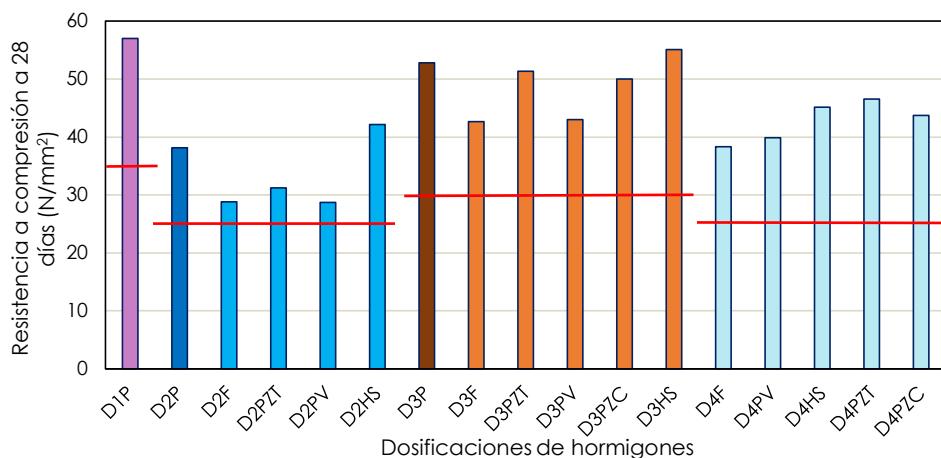
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.9.- Resultados experimentales de los ensayos de las amasadas de hormigón.**

Código Fecha Tipo de cemento	D1 23/9/15	D2P 16/3/16	D2F 7/4/16	D2PZI 14/4/16	D2PV 21/6/16	D2HS 14/4/16	D3P 25/5/16	D3F 25/5/16 II/A-P/42.5R MR	D3PV 31/5/16	D3HS 21/6/16	D3PZC 31/5/16	D4F 28/6/16	D4PV 30/6/16	D4HS 28/6/16	D4PZC 30/6/16
	Rest cto N/mm <sup>2</sup>	33	52,5	52,5	52,5	54,7	52,5	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7
Canitad cto (kg/m <sup>3</sup> )	325	300	240	240	240	300	240	240	240	240	300	300	300	300	300
Tipo Amasada	Patrón	Patrón	Filler	Puz Toba	Polvó	Humo	Patrón	Filler	Puz toba	Polvó	Humo	Filler	Puz	Polvó	Humo
Adición, kg/m <sup>3</sup>	—	—	60	60	60	—	—	60	60	60	60	60	60	60	60
Grava basáltica (kg/m <sup>3</sup> )	806,19	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75
Arena África (kg/m <sup>3</sup> )	688,08	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502
Cantidad agua (L/m <sup>3</sup> )	250,23	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75
Relación a/c/to (%)	0,51	0,76	0,73	0,73	0,73	0,73	0,56	0,58	0,57	0,58	0,57	0,73	0,73	0,73	0,73
Plastificante	—	—	—	—	—	—	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)	Timmo (%)
Superplasticante	Techmo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Consistencia, cm	4	10	5	8	8	6	15	19	15	12,5	4	19	14	11,5	16
Densidad fresca (kg/m <sup>3</sup> )	2399	2318	2364	2364	2323	2475	2410	2379	2358	2441	2423	2391	2365	2347	2343
Densidad 24 h (kg/m <sup>3</sup> )	2421	2320	2301	2328	2324	2318	2449	2400	2356	2332	2425	2408	2377	2343	2328
Densidad 28 días (kg/m <sup>3</sup> )	2428	2339	2321	2345	2342	2332	2468	2409	2391	2376	2441	2437	2400	2364	2350
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	2324	2110	2118	2209	2190	2238	2359	2261	2255	2206	2368	2282	2284	2269	2240
Porosidad occ. (%)	14,33	22,5	22,87	20,07	21,97	20,40	15,50	20,25	18,40	19,60	15,90	20,34	15,66	15,59	16,14
RCS Hgón (N/mm <sup>2</sup> )	57,00	38,14	28,81	31,22	28,71	42,15	52,79	42,65	51,34	43,00	55,08	50,00	38,32	46,54	39,87
Pen. agua media (mm)	18,8	56,9	Fuga	49,8	Fuga	52,9	31,5	37,1	39,4	33,7	42,09	40,1	40,5	37,6	38,9
Pen. agua max. (mm)	25,2	68,3	Fuga	58,5	Fuga	60,4	48,5	52,7	48,9	52,2	48,3	49,8	57,2	54,8	54,8
RM 28 días (S.m)	115,4	107,5	104,8	111,9	83,8	260,7	109,9	72,2	106,6	86,2	283,9	79,4	98,9	120,0	96,8
RC 28 días (Ω.m)	109,5	99,8	97,2	113,8	85,3	248,5	111,9	68,4	104,1	80,4	294,7	80,7	99,2	120,6	98,0
RD 28 días (Ω.m)	112,0	104,8	101,4	122,5	94,1	260,3	121,8	71,3	109,8	85,3	295,3	86,8	100,1	118,3	100,5
Vco <sub>2</sub> natural (mm/n <sup>1/2</sup> )	0,00	3,15	3,50	2,97	3,29	1,41	2,14	1,41	2,03	1,77	1,54	3,17	2,40	3,11	2,81
Vco <sub>2</sub> acelerada (mm/n <sup>1/2</sup> )	0,00	17,67	31,09	26,17	30,84	25,32	7,55	16,78	14,05	18,22	15,92	15,60	18,61	14,64	17,55
Prof. Cl piscina (mm)	4,2	13,8	13	16	11	11,8	16,5	13,5	13,8	12,5	13	15,3	13	17,3	14
Vc perfil (mm/n <sup>1/2</sup> )	8,46	27,85	31,72	26,18	32,22	22,03	23,66	33,05	27,04	27,54	25,03	26,04	30,54	26,18	34,55
Piscina D <sub>m</sub> × 10 <sup>-8</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	0,6329	7,205	7,489	6,016	5,663	4,100	9,223	6,363	6,540	4,880	7,789	6,243	4,492	7,618	4,490
Multifre. D <sub>ns</sub> × 10 <sup>-8</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	3,0516	4,8058	6,6414	5,9510	8,9613	4,0285	3,5094	19,9510	2,3337	2,9972	5,41168	2,8636	6,2301	2,3694	5,5947
Multifre. D <sub>s</sub> × 10 <sup>-8</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	2,0949	7,6557	9,2614	3,6185	11,1790	1,5430	3,2596	9,1384	2,5508	7,1619	1,2404	5,2873	7,7914	2,4777	8,7149
Integral D <sub>ns</sub> × 10 <sup>-8</sup> (cm <sup>1/2</sup> /s)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,191	4,019	—	6,028
Tiempo despiravación (s)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2332800	2332800	2332800	1555200

#### 6.4.1. Resultados de ensayos de resistencia, consistencia y densidades.

Los ensayos de resistencia, consistencia y densidad, descritos en los apartados 3.2.2 al 3.2.4, son los ensayos más directos, rápidos y utilizados en un control de obra rutinario de hormigones, ya que *in situ* o tras los 28 días de curado aportan datos orientativos de la docilidad, resistencia y calidad del hormigón empleado. En la figura 6.12 se representa la resistencia a compresión simple de las probetas de hormigón de las distintas amasadas fabricadas.



**Figura 6.12.-** Resultados de la resistencia a compresión de los hormigones dosificados ( $N/mm^2$ ) y líneas de la resistencia característica mínima en cada dosificación.

En la tabla 6.10 se presentan los porcentajes de variación de la resistencia en función del tipo de amasada ensayada.

**Tabla 6.10.-** Porcentajes de variación de la resistencia de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Resistencia media a compresión a los 28 días de los hormigones patrón ( $N/mm^2$ )	Porcentaje de variación de resistencia de los hormigones con adiciones (%)				
D1P 57,00	No se ha adicionado a la dosificación D1P				
D2P 38,14	D2F -24,46	D2PZT -18,14	D2PV -24,72	D2HS 10,51	---
D3P 52,59	D3F -19,21	D3PZT -2,75	D3PV -18,55	D3HS 4,34	-5,29
D4P=D2P 38,14	D4F 1,47	D4PZT 22,02	D4PV 3,22	D4HS 18,35	D4PZC 14,63

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

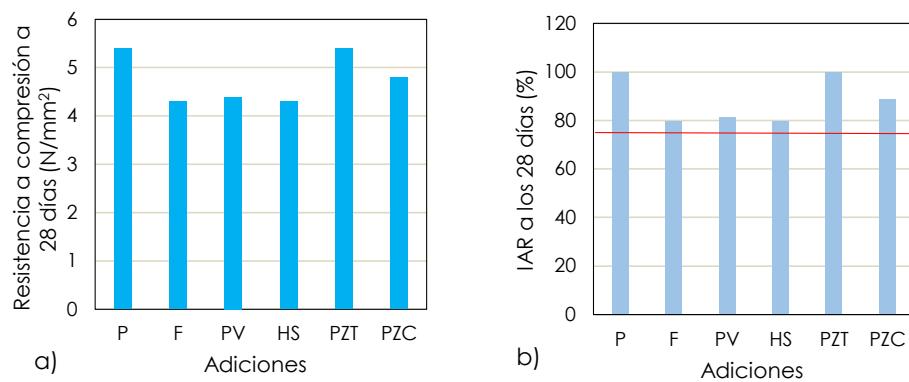
De los resultados representados y mostrados en la figura 6.12 y tabla 6.10 se aprecia que todas las resistencias de los hormigones dosificados en laboratorio son menores a la obtenida para la dosificación D1P (dosificación patrón encuadrada como durable por sus características de dosificación). En las dosificaciones D2 y D3 se observa que las disminuciones de resistencia más acusada se dan en las muestras que contienen las adiciones de filler (F) y polvo de pulir (PV), siendo de casi el 25% en la dosificación D2 y valores muy próximos al 20% en la D3. Pero se ha de aclarar, que en ningún caso las resistencias bajan por debajo de la requerida para un hormigón HA-25 en el caso de la dosificación D2 y D4; ni de HA-30 en el caso de la dosificación D3. Como se puede ver en la figura 6.12, todas las amasadas superan la resistencia característica mínima exigida de 25 N/mm<sup>2</sup> y 30 N/mm<sup>2</sup> respectivamente, indicada en la gráfica con unas líneas rojas. Las amasadas adicionadas con humo de sílice D2HS son las únicas que presentan un aumento en la resistencia con respecto a la dosificación patrón, con unos aumentos del 4% para la D2HS y del 10% para la D3HS. En cambio, en la dosificación D4, en la que el 20% de la adición no ha sido restada a la cantidad de cemento, sino que se ha incorporado como árido, las resistencias se mantienen aproximadamente igual a la dosificación patrón (D2P=D4P) para las amasadas con filler y polvo de pulir (D4F y D4PV), mientras que la resistencia aumenta con las otras tres adiciones. De mayor a menor incremento de resistencia tendríamos puzolana de toba (D4PZT) (incremento del 22%), humo de sílice (D4HS) (18%) y, por último, puzolana de cantera con un incremento de casi el 15%.

Paralelamente al ensayo de resistencia a compresión de los hormigones, se ha determinado el índice de actividad resistente, que es una de las tres especificaciones de la norma UNE 80303-2:2001 [11] que establece cómo usar un material puzolánico como adición para los cementos comunes resistentes al agua de mar. Siguiendo el método de ensayo de la norma UNE EN 196-1 [12] con una mezcla 75/25 en masa deberá dar una resistencia a la compresión a la edad de los 28 días que debe ser igual o superior al 75% de la resistencia del cemento referencia un I 42,5 R/SR. En la tabla 6.11 y figura 6.13 se muestra como todas las adiciones han superado el límite del 75% de la resistencia, e incluso se aprecia como en los casos de las dos puzolanas y el humo de sílice las resistencias son muy superiores al 75% requerido.

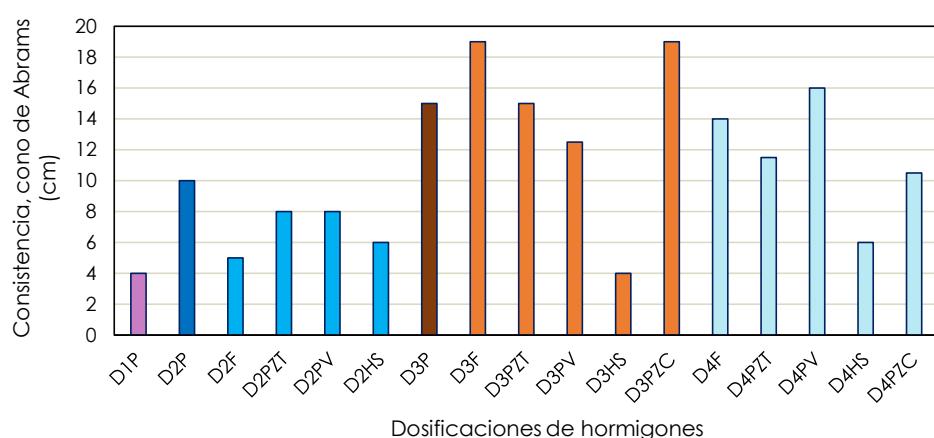
**Tabla 6.11.-** Resultados de las resistencias a flexión, compresión y el índice de actividad resistente de las adiciones con el cemento patrón.

Muestra	Adición	Resistencia flexión (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia compresión (N/mm <sup>2</sup> )	IAR (%)
Cto I/42,5R/SR	Patrón	10,1	5,4	100
75% Cto + 25% F	Filler	8,3	4,3	79,6
75% Cto + 25% PV	Polvo de pulir	8,9	4,4	81,5
75% Cto + 25% HS	Humo de sílice	7,7	4,3	79,6
75% Cto + 25% PZT	Puzolana de toba	9,1	5,4	100
75% Cto + 25% PZC	Puzolana de cantera	8,7	4,8	88,9

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



En la figura 6.14 se muestran los resultados de consistencia de las diferentes amasadas evaluadas con el cono de Abrams.



**Figura 6.14.-** Resultados de consistencia mediante el ensayo del cono de Abrams (cm).

Recordemos que para evaluar la consistencia hay que recurrir a la tabla 6.12 que recoge la clasificación del cono de Abrams.

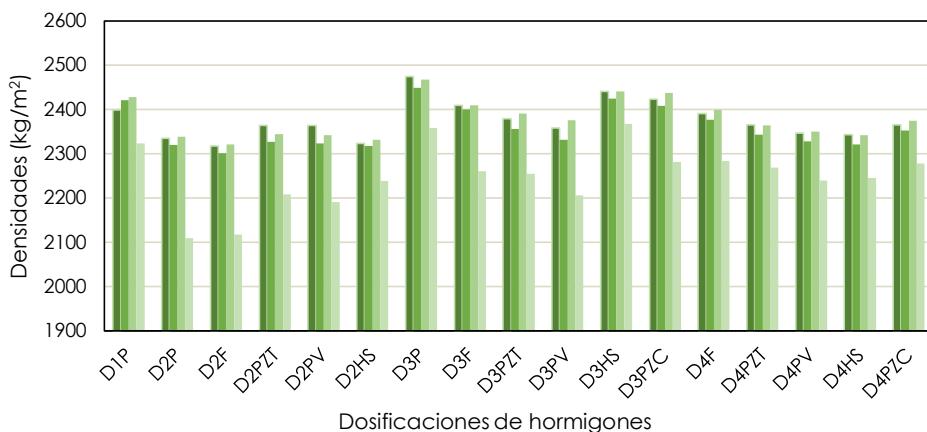
**Tabla 6.12.-** Clasificación de la consistencia por el cono de Abrams.

Consistencia en cono		Normativa Europea	
Consistencia	Asentamiento (cm)	Clase	Asentamiento (mm)
Seca	0 a 2	S1	10 a 40
Plástica	3 a 5	S2	50 a 90
Blanda	6 a 9	S3	100 a 150
Fluida	10 a 15	S4	≥ 160
Líquida	≥ 16		

Sabiendo que la consistencia de un hormigón debe ser la adecuada para su uso, sistema de puesta en obra y elemento hormigonado, y que la consistencia de una masa depende de la granulometría, forma, tamaño y dosificación de los áridos, cantidad de finos, cemento, agua, y aditivos, la incorporación a las dosificaciones patrón de los distintos materiales, nos puede dar una idea de cuál es el aspecto que en mayor medida le está afectando a la consistencia y docilidad del hormigón.

De los resultados representados en la figura 6.14, se observa que todos los hormigones dosificados se mueven en un intervalo de consistencias entre las clasificadas como plástica y líquida, según el tipo de dosificación de la que se esté hablando. La dosificación D2 con una relación agua/cemento alta, y plastificante, se mueve en un rango entre 5 y 8 cm observándose que ninguna de las amasadas adicionadas mejora la docilidad con respecto a la dosificación patrón, es decir, que el cono tiene un asiento de menos cm y nos encontramos con amasadas más secas que la patrón. Esto puede ser debido a que la relación agua/cemento de la dosificación patrón es 0,76 y de las amasadas adicionadas es de 0,73, ligeramente inferior. La dosificación D3, con una relación agua/cemento (0,56-0,58%) menor que la amasada D2, lograda con el uso de plastificante y superplastificante, está en un rango de asiento de 4 a 19 cm. En estos casos con uso de nuevos aditivos, la incorporación de las adiciones no afecta tanto a la consistencia, excepto en el caso del humo de sílice donde el cono se ve muy reducido hasta los 4 cm, un cambio muy brusco de consistencia de fluida a plástica. La dosificación D4, con una relación agua/cemento de 0,73, el uso de plastificante y la incorporación de los materiales como áridos superfinales, arrojan asientos de conos de entre 6 a 16 cm, asientos de conos superiores a los dados por la dosificación D2, aunque ambas tienen una relación agua/cemento parecida. Las amasadas con los materiales incorporados como superfinales mantienen en una consistencia fluida, excepto de nuevo en el caso del humo de sílice que acusa una disminución del asiento del cono a 6 cm, es decir, que pierde docilidad pasando de fluida a blanda.

En la figura 6.15 se recogen los resultados obtenidos en los distintos ensayos de densidad.



**Figura 6.15.-** Resultados de los distintos ensayos de densidad: •densidad fresca, •densidad a las 24 h, •densidad tras un curado de 28 días y •densidad seca (kg/m³).

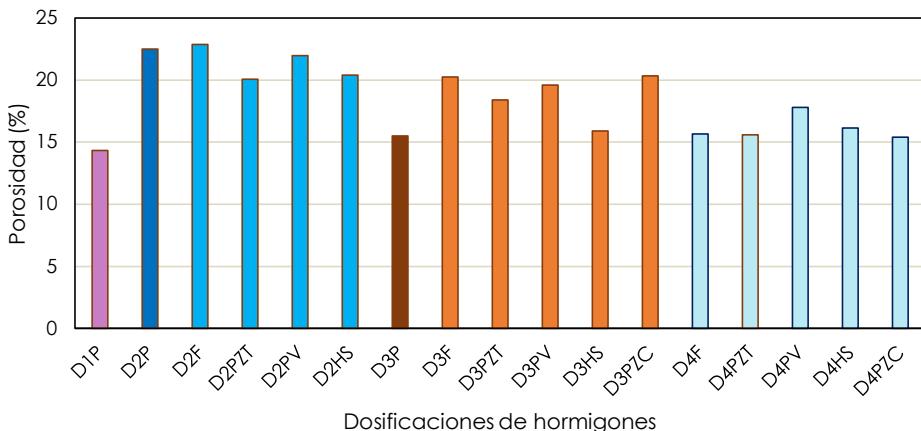
En la figura 6.15 se visualizan los diferentes tipos de densidades ensayadas a cada una de las amasadas de los hormigones dosificados en laboratorio (densidad fresca, a las 24 h, tras curado de 28 días y seca). Se observa que las distintas densidades se mueven en una horquilla que va desde 2100 a 2500 kg /m³. De manera generalizada se aprecia una disminución de la densidad a las 24 h después del desenmoldado con respecto de la fresca, un posterior aumento de la densidad de las probetas saturadas tras los 28 días de curado en cámara húmeda y finalmente con una lógica bajada de la densidad seca que varía entre un 3 a un 10%. Todas estas subidas y bajadas de la densidad son debidas al aumento y disminución de la cantidad de agua contenida en la probeta.

#### 6.4.2. Ensayos de porosidad accesible.

Mediante este ensayo, descrito en el apartado 3.2.8, podemos evaluar cómo se ve afectada la porosidad accesible, diferenciando muestra adiconada como adición o como superfino, por la forma de incorporar las adiciones y del tipo de adición con respecto a las dosificaciones patrón.

En la figura 6.16 se muestran los resultados obtenidos y en la tabla 6.13 se muestran los porcentajes de variación de la porosidad accesible en función de la adición con respecto a la probeta patrón.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.16.-** Resultados de los distintos ensayos de porosidad de las dosificaciones (%).

**Tabla 6.13.-** Porcentajes de variación de la porosidad accesible de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Porosidad de los hormigones patrón (%)	Porcentaje de variación de la porosidad de los hormigones con adiciones (%)				
D1P	La dosificación D1P no se ha adicionado				
14,33					
D2P	D2F	D2PZT	D2PV	D2HS	---
22,50	1,64	-10,80	-2,36	-9,33	---
D3P	D3F	D3PZT	D3PV	D3HS	D3PTC
15,50	30,65	31,23	26,45	2,58	18,71
D2P=D4P	D4F	D4PZT	D4PV	D4HS	D4PTC
22,50	-30,40	-30,71	-20,89	-28,27	-31,56

Observamos que la menor porosidad es la presentada por la dosificación patrón D1P. Las porosidades de la dosificación D2, con una alta relación agua/cemento, indican que, a pesar de reducir el porcentaje de cemento con la incorporación de la adición, las amasadas con adición de puzolana de toba (D2PZT) y humo de sílice (D2HS) reducen la porosidad con respecto a la amasada patrón en aproximadamente un 10%. En cambio, la dosificación D3, con una relación agua/cemento menor, en las amasadas con adiciones, las porosidades han aumentado, llegando en algunos casos hasta el 30% más de porosidad accesible. En cuanto a la dosificación D4, al mantener la cantidad de cemento e introducir las

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

adiciones como un árido superfino, las porosidades se han visto reducidas en todos los casos entre un 20 y un 31%.

#### **6.4.3. Ensayos de penetración de agua.**

El ensayo de penetración de agua descrito en el apartado 3.2.5 de la presente tesis, es un parámetro establecido en la EHE-08 [13] para el control de la durabilidad de hormigones, ensayo que se exige para hormigones sometidos a ambientes III y IV, recogidos en su artículo 37.3.3 en el que se indican los límites de profundidades de penetración, recogidos en el presente trabajo en la tabla 3.18 del capítulo 3.

Como se puede ver en la tabla 6.9, la mayoría de las amasadas dosificadas han revelado resultados que superan uno o los dos parámetros límites establecidos por la norma por lo que, *a priori*, sólo la amasada patrón D1P cumpliría con este ensayo. Las amasadas patrón D2P y D3P no se podrían catalogar, pero sí nos dan una idea del grado de impermeabilización de los hormigones dosificados y su mejora o empeoramiento con el uso de las adiciones.

Se aprecia que al introducir la adición tanto de puzolana de toba como de humo de sílice en la dosificación D2, restando un 20% a la cantidad de cemento, se obtienen resultados mayores que para la amasada patrón, produciéndose problemas de fugas en las amasadas con filler (F) y polvo de pulir (PV). En las amasadas adicionadas D3, al introducir la adición se obtienen resultados de penetración de agua iguales o mayores que la dosificación patrón. En cambio, en la dosificación D4, en la que el porcentaje de adición no ha sido restado al cemento, los resultados no sólo se mantienen, sino que además parece que incluso mejoran respecto al patrón (D2P=D4P). Las dos amasadas que arrojan la mayor mejoría serían la amasada con puzolana de toba (D4PZT) y el humo de sílice (D4HS). Hay que aclarar que, si bien ninguna llega a superar los límites de la comprobación experimental de la impermeabilidad de un hormigón para ambientes restrictivos, se observan ciertas tendencias, como que de forma general la adición de puzolana en las dosificaciones de mayor relación agua/cemento (0,73%) dificulta la penetración de agua.

#### **6.4.4. Ensayos de resistividad eléctrica de las dosificaciones de laboratorio.**

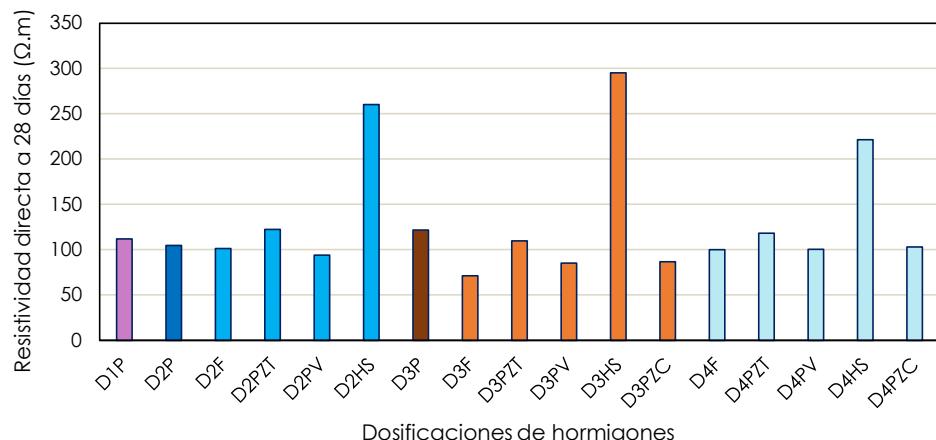
##### **6.4.4.1. Resistividad eléctrica. Método directo a los 28 días.**

En la figura 6.17 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistividad directa (RD) a 28 días, descrito en el apartado 3.2.6.1.

Se observa que los valores de resistividad son cercanos a los 100 Ω.m en todas las amasadas, excepto en los casos donde se ha introducido el humo de sílice como adición que ronda los 250-300 Ω.m. Las tres dosificaciones patrón superan

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

escasamente los 100 Ω.m, no distinguiéndose una variación significativa de la resistividad al introducir las adiciones.



**Figura 6.17.-** Resultados de la resistividad eléctrica por el método directo (RD) de las dosificaciones.

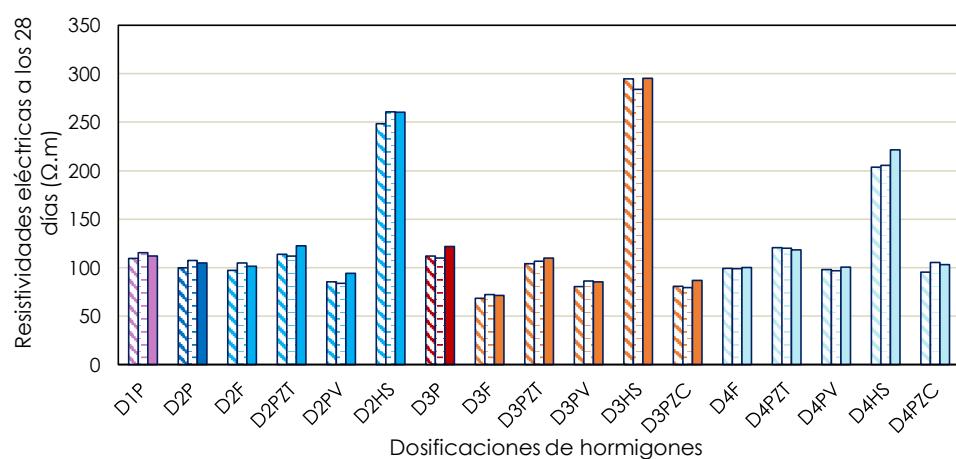
Si comparamos las amasadas adicionadas con sus respectivas amasadas patrón, nos encontramos que en las tres dosificaciones (D2, D3 y D4) las amasadas adicionadas con filler (F), polvo de pulir (PV) y puzolana de cantera (PZC) arrojan valores de resistividad más bajos que su respectiva amasada patrón, mientras que en las amasadas adicionadas con puzolana de toba (PZT) aumenta en las dosificaciones D2 y D4, y con humo de sílice (HS) en las tres dosificaciones en las que se emplea. En la tabla 6.14 se muestran los porcentajes de variación de la resistividad en función del tipo de dosificación.

**Tabla 6.14.-** Porcentajes de variación de la resistividad eléctrica de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Resistividad de los hormigones patrón (%)	Porcentaje de variación de la resistividad directa (RD) con adiciones (%)				
D1P	La dosificación D1P, no se ha adicionado				
112,00					
D2P	D2F	D2PZT	D2PV	D2HS	---
104,80	-3,24	16,89	-10,21	148,38	---
D3P	D3F	D3PZT	D3PV	D3HS	D3PTC
121,80	-41,45	-9,82	-29,97	142,45	-28,74
D2P	D4F	D4PZT	D4PV	D4HS	D4PTC
104,80	-4,48	12,88	-4,10	111,35	-1,62

#### 6.4.4.2. Resistividad eléctrica. Comparativa de los tres métodos de resistividad.

En la figura 6.18 se representan los resultados obtenidos al determinar la resistividad eléctrica de las distintas amasadas, obtenidas tanto por el método directo como por el método indirecto de las cuatro puntas que ha sido determinado empleando dos equipos distintos, descritos en el apartado 3.2.6. La resistividad eléctrica determinado por el método de cuatro puntas o Wenner se considera indirecto, por lo que hay que incorporar al valor del método indirecto obtenido por el equipo comercial resipod y por el equipo de metacrilato de fabricación propia, un factor de calibración frente al método directo. El dato leído por estos equipos es la resistividad en un medio semi-infinito para una separación entre las puntas de 0,05 m y al realizar la medida sobre una probeta de dimensiones limitadas (15x30) hay que multiplicar, según la UNE 83988-2 [14], por el factor de forma ( $F_f$ ) de 0,606 o, lo que es lo mismo, dividir por el llamado coeficiente de Morris de 1,65 [15], tal y como se expuso en el capítulo 5.



**Figura 6.18.-** Resultados de las tres resistividades eléctricas de las dosificaciones a los 28 días, donde ■ es la resistividad indirecta o de cuatro puntas con el equipo comercial (RIC), ▨ es la resistividad indirecta o de cuatro puntas con el equipo fabricado con metacrilato (RIM) y ■■■ es la resistividad indirecta o de cuatro puntas con el equipo fabricado con metacrilato (RIM).

Los resultados obtenidos de resistividad por los tres métodos arrojan valores muy similares y muy próximos a 100  $\Omega\text{.m}$ . Las resistividades determinadas por el método indirecto de cuatro puntas, medida con los dos tipos de equipos descritos en el capítulo 3 y mencionados en el párrafo anterior, con respecto a la resistividad directa, presenta unas diferencias porcentuales que oscilan entre un 1 y un 11%. Las tablas 6.15 y 6.16 recogen los porcentajes de variación de las resistividades indirectas por el método de las cuatro puntas con los equipos comercial y con el equipo de metacrilato, de todas las amasadas adicionadas con respecto a su amasada patrón.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 6.15.-** Porcentajes de variación de la resistividad a los 28 días, por el método de las cuatro puntas con el equipo comercial, de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Resistividad a los 28 días de los hormigones patrón ( $\Omega \cdot m$ )	Porcentaje de variación de la resistividad indirecta (RIC) con adiciones (%)				
D1P 109,52	La dosificación D1P, no se ha adicionado				
D2P 99,82	D2F -2,67	D2PZT 13,96	D2PV -14,51	D2HS 148,94	---
D3P 111,94	D3F -38,93	D3PZT -7,04	D3PV -28,15	D3HS 163,29	-27,88
D2P 99,82	D4F -0,61	D4PZT 20,83	D4PV -1,82	D4HS 104,01	-4,49

**Tabla 6.16.-** Porcentajes de variación de la resistividad a los 28 días, por el método de las cuatro puntas con el equipo de metacrilato de fabricación propia, de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Resistividad a los 28 días de los hormigones patrón ( $\Omega \cdot m$ )	Porcentaje de variación de la resistividad indirecta (RIM) con adiciones (%)				
D1P 115,40	La dosificación D1P, no se ha adicionado				
D2P 107,50	D2F -2,51	D2PZT 4,09	D2PV -22,05	D2HS 142,51	---
D3P 109,90	D3F -34,30	D3PZT -3,00	D3PV -21,57	D3HS 158,33	-27,75
D2P 107,50	D4F -8,00	D4PZT 11,63	D4PV -9,96	D4HS 91,16	-2,05

Se observa que en todas las dosificaciones el humo de sílice provoca un aumento en la resistividad eléctrica, independientemente de que sustituya al cemento o al árido en la dosificación. La puzolana de toba apenas afecta al valor de resistividad cuando se dosifica sustituyendo a parte del cemento, provocando un aumento superior al 10% cuando se adiciona como árido. Tanto el filler, como la puzolana de cantera y el polvo de pulir provocan una disminución en el valor de la resistividad con respecto a la dosificación patrón.

#### 6.4.5. Ensayos de carbonatación.

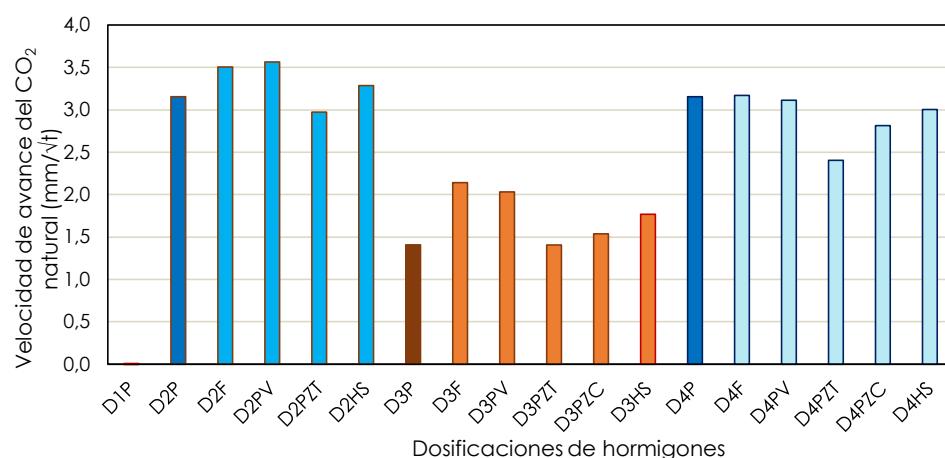
Los resultados de carbonatación de las probetas de hormigón se dividen en función del tipo de exposición al  $CO_2$ , teniendo exposición a ambiente natural y

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

exposición en cámara o acelerada mediante una exposición al agresivo a una mayor concentración dentro una cámara estanca.

#### 6.4.5.1. Ensayo de carbonatación natural. Método B.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos con relación al avance de la carbonatación en el interior de las muestras de los distintos hormigones dosificados expuestos a la atmósfera, ensayo descrito en el apartado 3.2.9.1. La gráfica de la figura 6.19 representa la velocidad de carbonatación ( $V_{CO_2}$  en mm/ $\sqrt{t}$ ) que será muy parecida a la gráfica de la profundidad media de penetración ( $X_{CO_2}$  en mm), de las muestras expuestas a un ambiente natural protegido de la acción directa de la lluvia, tras un tiempo de exposición de tres meses, entre 89 y 116 días según el caso. En la tabla 6.17 se muestran los porcentajes de variación de la velocidad de carbonatación en función del tipo de dosificación.



**Figura 6.19.-** Resultados de la velocidad de carbonatación natural a los 3 meses, de las dosificaciones de hormigones.

Entre los resultados obtenidos destaca la dosificación 1 (D1P), la cual no se ha visto afectada por el proceso agresivo, mientras que el resto de dosificaciones sí. En la dosificación 2 con adiciones, todos los avances de la carbonatación son mayores que la dosificación patrón 2 (D2P), excepto la adicionada con puzolana de toba (D2PZT). Este hecho se vuelve a observar en las dosificaciones 3 y 4. Las dosificaciones patrón D2P y D3P presentan avances de la carbonatación menores que sus amasadas adicionadas en la mayoría de los casos, con incrementos que oscilan entre el 4,16% para el humo de sílice al 52% con el filler. Esto ocurre en todos los casos excepto para las dosificaciones adicionadas con la puzolana de toba (D2PZT y D3PTZ).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

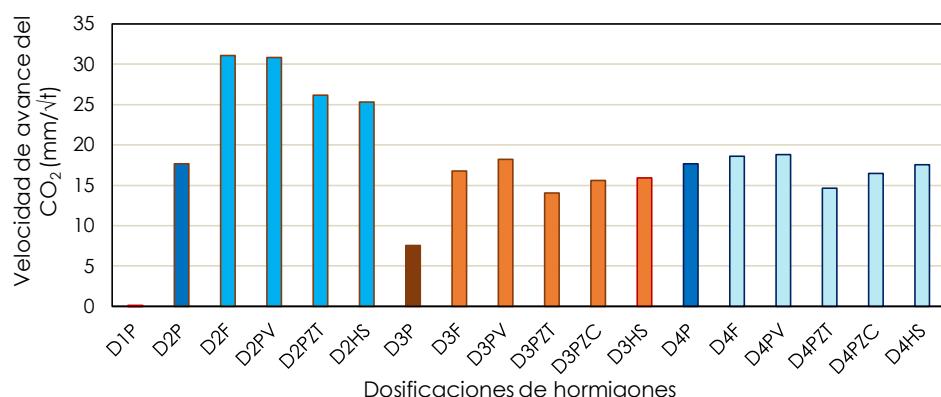
**Tabla 6.17.-** Porcentajes de variación de la carbonatación natural a 3 meses, de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

<b>Velocidad de carbonatación natural de las dosificaciones (mm/<math>\sqrt{t}</math>)</b>	<b>Porcentaje de variación de la velocidad de carbonatación natural de los hormigones con adiciones (%)</b>				
D1P 0	La dosificación D1P, no se ha adicionado				
D2P 3,15	D2F 11,12	D2PZT -5,75	D2PV 13,01	D2HS 4,16	---
D3P 1,41	D3F 52,08	D3PZT -0,12	D3PV 44,33	D3HS 25,60	D3PTC 9,22
D2P=D4P 3,15	D4F 0,49	D4PZT -23,77	D4PV -1,31	D4HS -4,78	D4PTC -10,80

En el caso de las dosificaciones D4, donde la adición no ha sido restada al cemento sino a los áridos como si fuera un superfino, las velocidades de carbonatación son aproximadamente igual a la amasada patrón e incluso menor, como para las dosificaciones D4PZT, D4PZC y D4HS.

#### 6.4.5.2. Ensayo de carbonatación. Método acelerado.

Este ensayo mide los valores de la velocidad de carbonatación de forma acelerada ( $X_{CO_2}$ ) en las probetas de las amasadas de hormigón, de modo que la medición del avance de penetración se mide tras ser expuestas durante 14 días a una atmósfera agresiva de un 3% de CO<sub>2</sub>, ensayo descrito en el apartado 3.2.9.2. En la figura 6.20 se exponen los resultados obtenidos.



**Figura 6.20.-** Resultados de la velocidad de carbonatación acelerada de las distintas amasadas.

En la tabla 6.18 se muestran los porcentajes de variación de la velocidad de carbonatación en función del tipo de dosificación.

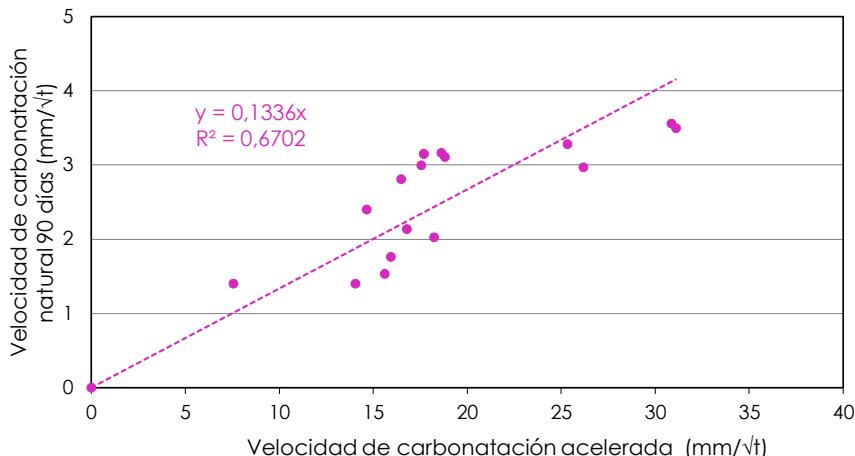
**Tabla 6.18.-** Porcentajes de variación de la velocidad de carbonatación acelerada al 3%, de los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

<b>Velocidad de carbonatación acelerada de las dosificaciones (mm/<math>\sqrt{t}</math>)</b>	<b>Porcentaje de variación de la velocidad de carbonatación acelerada de los hormigones con adiciones (%)</b>				
D1P 0	La dosificación D1P, no se ha adicionado				
D2P 17,67	D2F 75,92	D2PZT 48,10	D2PV 74,53	D2HS 43,31	---
D3P 7,55	D3F 122,33	D3PZT 86,20	D3PV 141,45	D3HS 111,03	D3PTC 106,79
D2P 17,67	D4F 5,29	D4PZT -17,13	D4PV 6,44	D4HS -0,66	D4PTC -6,77

En función de los resultados mostrados tanto en la figura 6.20 como en la tabla 6.18, se observa que se repite la misma situación que en la carbonatación natural. La dosificación 1 (D1P) no se ha visto afectada por el proceso agresivo, mientras que el resto de dosificaciones sí. En la dosificación 2, todos los avances de la carbonatación de las amasadas adicionadas son mayores que la dosificación patrón 2 (D2P), de modo que la carbonatación ha aumentado en un rango del 43 al 76% siendo los valores menores los encontrados en las amasadas D2PZT y D2HS. En la dosificación 3, la situación anterior se repite, pero con un aumento de la carbonatación mucho mayor en un rango del 86 al 141% y los valores menores son los de las amasadas D3PZT, D3PZC y D3HS. Por otra parte, en el caso de las dosificaciones 4, todas las amasadas adicionadas dan valores de velocidad de carbonatación aproximadamente iguales a la amasada patrón e incluso menores, en tres de las amasadas D4PZT, D4PZC y D4HS.

La gráfica de la figura 6.21 muestra la relación entre los dos tipos de avance de velocidad de la carbonatación: natural y acelerada. Se observa que la relación existente sigue una tendencia lineal para todo el conjunto de muestras analizadas, obteniéndose un índice de regresión de 0,67. Esto indica que la correlación entre ambos métodos de carbonatación es independiente de la naturaleza de las muestras analizadas. Los valores de velocidad de carbonatación obtenidos por exposición natural son, aproximadamente, un 13% de los obtenidos a través de ensayos acelerados.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.21.-** Relación entre velocidad de carbonatación acelerada al 3% y velocidad de carbonatación natural a 90 días de las distintas amasadas.

#### 6.4.6. Medida de la penetración de cloruros.

##### 6.4.6.1. Inmersión en piscina.

A través del ensayo de inmersión en piscina durante 90 días, descrito en el apartado 3.2.10.1, se caracteriza el fenómeno del avance de los cloruros en las distintas muestras de hormigón amasadas, mediante la obtención de variables tales como la concentración superficial de cloruros en % de peso de cemento, la profundidad del perfil ( $X_{Cl\ perfil}$ ), la velocidad de avance del agresivo ( $V_{Cl\ perfil}$ ), el coeficiente de la difusión no estacionario de cloruros ( $D_{ns}$ ) y el  $R^2$  del ajuste, todos ellos recogidos en la tabla 6.19.

El valor de profundidad de penetración del agresivo en el hormigón, se ha considerado como la profundidad hasta la que penetra una concentración de cloruros igual o superior a la concentración crítica de cloruros que provoca la corrosión del acero en el hormigón armado. Se considera como valor crítico el valor igual o superior a 0,4% sobre peso del cemento y al recalcular este porcentaje como porcentaje sobre peso de hormigón, el valor es de 0,06% [13].

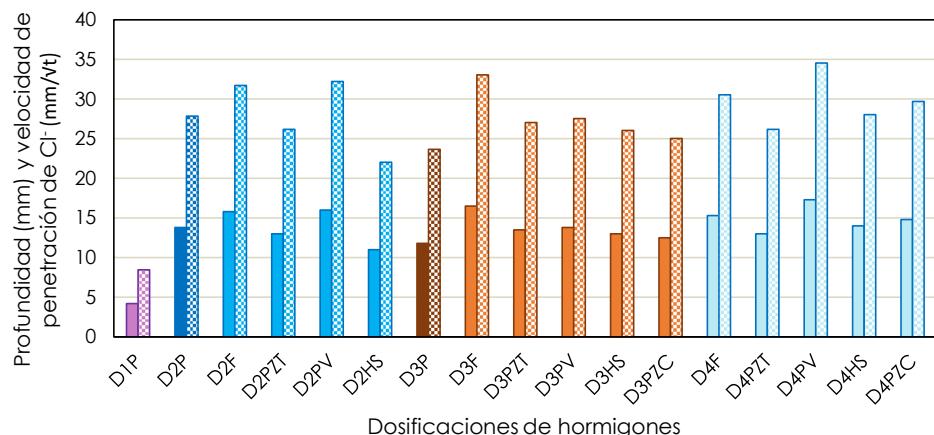
En la tabla 6.19 y en la figura 6.22 se muestran los resultados de profundidad y velocidad de penetración de cloruros en las diferentes dosificaciones. En la tabla 6.20 se muestran los porcentajes de variación de las diferentes dosificaciones respecto a la dosificación patrón. Las amasadas en las que se ha incorporado filler (F), polvo de pulir (PV) y puzolana de cantera (PZC) presentan un aumento en la penetración de cloruros respecto a la dosificación patrón, mismo comportamiento observado para todas las dosificaciones. En las amasadas con puzolana de toba (PZT) y humo de sílice

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

(HS) la velocidad de penetración de cloruros se ha visto reducida o igualada con respecto a la amasada patrón.

**Tabla 6.19.-** Penetración y coeficientes de difusión de cloruros en hormigones, tanto de las amasadas patrón como de las amasadas con adiciones.

Muestras	$C_s$ % peso cemento	$X_{Cl}$ perfil (mm)	$V_{Cl}$ perfil (mm/ $\sqrt{t}$ )	Probeta 1		Probeta 2		$D_{ns}$ medio $\times 10^{-8}$ (cm $^2$ /s)
				$D_{ns} \times 10^{-8}$ (cm $^2$ /s)	$R^2$	$D_{ns} \times 10^{-8}$ (cm $^2$ /s)	$R^2$	
D1P	1,77	4,2	8,46	0,787	0,980	0,479	0,998	0,633
D2P	1,07	13,8	27,85	8,787	0,891	5,622	0,960	7,205
D2F	2,99	15,8	31,72	7,440	0,980	7,537	0,980	7,489
D2PZT	2,84	13,0	26,18	6,016	0,984	-	-	-
D2PV	1,92	16,0	32,22	7,357	0,985	-	-	-
D2HS	2,76	11,0	22,03	5,149	0,962	6,177	0,992	5,663
D3P	2,61	11,8	23,66	4,000	0,986	4,200	0,976	4,100
D3F	2,68	16,5	33,05	1,055	0,913	7,896	0,964	9,223
D3PZT	2,22	13,5	27,04	5,929	0,975	6,796	0,951	6,363
D3PV	2,61	13,8	27,54	5,165	0,959	7,914	0,941	6,540
D3HS	2,07	12,5	25,03	4,301	0,992	5,459	0,967	4,880
D3PZC	2,53	13,0	26,04	7,463	0,902	8,116	0,939	7,789
D4P-D2P	2,99	13,8	27,85	8,787	0,891	5,622	0,960	7,205
D4F	2,84	15,3	30,54	6,080	0,971	6,405	0,967	6,243
D4PZT	2,84	13,0	26,18	4,398	0,994	4,585	0,992	4,492
D4PV	2,91	17,3	34,55	8,123	0,973	7,112	0,981	7,618
D4HS	2,76	14,0	28,04	4,912	0,989	4,069	0,986	4,490
D4PZC	2,61	14,8	29,70	5,481	0,986	6,201	0,990	5,841



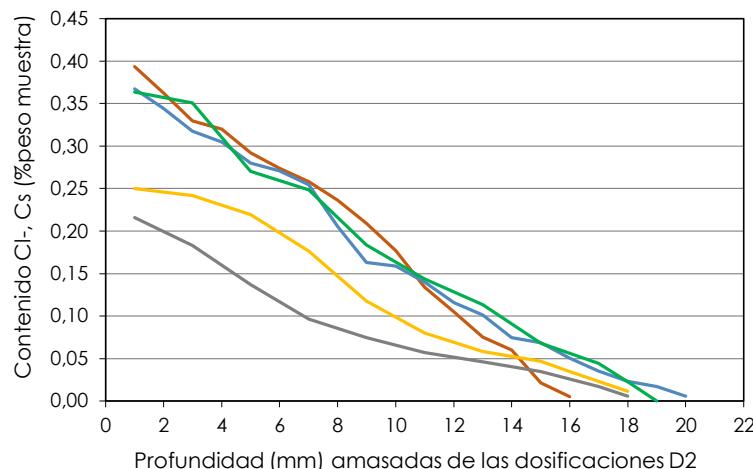
**Figura 6.22.-** ■ Profundidad (mm) y ▨ velocidad de penetración (mm/ $\sqrt{t}$ ) de los cloruros con el dispositivo de inmersión en piscina 90 días, de las distintas amasadas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280		Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00	
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53	
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19	
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04	

**Tabla 6.20.-** Porcentajes de variación de la velocidad de penetración de los cloruros, en los hormigones con adiciones respecto a las dosificaciones de los hormigones patrón.

Velocidad de penetración de los cloruros en las dosificaciones patrón (mm/ $\sqrt{t}$ )	Porcentaje de variación de la velocidad de penetración de los cloruros en los hormigones con adiciones (%)				
D1P	No se ha adicionado a la dosificación D1P				
8,46					
D2P	D2F	D2PZT	D2PV	D2HS	--
27,85	13,91	-5,98	15,72	-20,88	--
D3P	D3F	D3PZT	D3PV	D3HS	D3PTC
23,66	39,65	14,16	16,38	5,80	10,03
D2P=P4D	D4F	D4PZT	D4PV	D4HS	D4PTC
27,85	9,68	-5,98	24,07	0,69	6,68

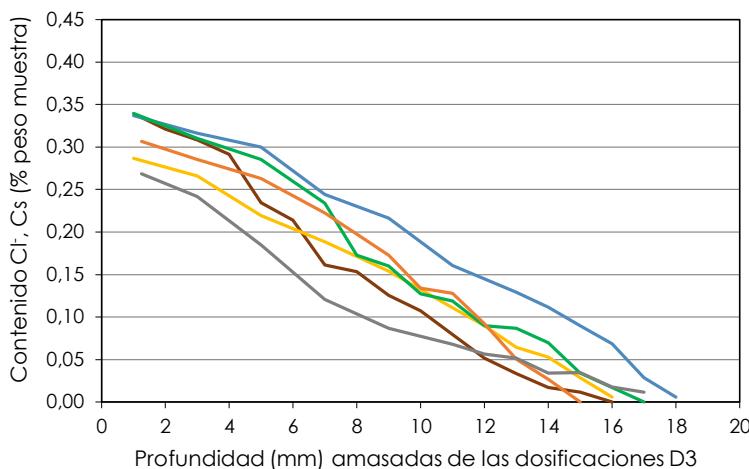
En las figuras 6.23 a 6.25 se representan los perfiles del avance de la penetración de cloruros en las tres dosificaciones (D2, D3, D4). En ellas se representa el contenido de cloruros como porcentaje sobre peso de muestra frente a la profundidad de penetración en mm.



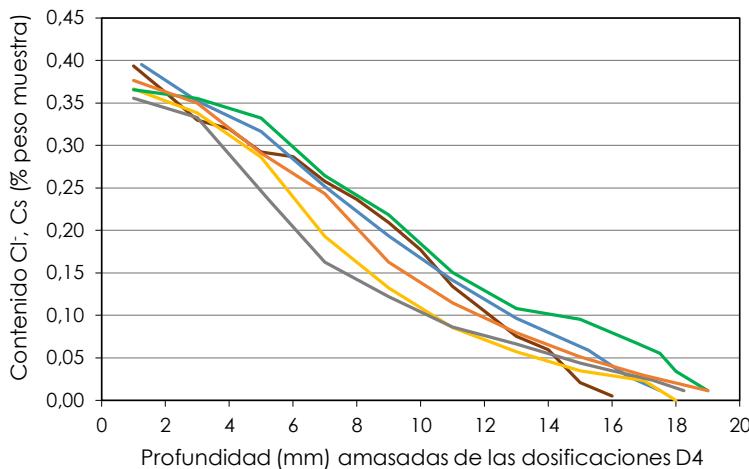
**Figura 6.23.-** Perfil de avance de los cloruros en las amasadas de la dosificación D2

(• patrón D2P, • adición de filler D2F, • adición de puzolana de toba D2PZT, • adición de polvo de pulir D2PV, • adición de humo de sílice D2HS).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.24.-** Perfil de avance de los cloruros en las amasadas de la dosificación D3  
 (• patrón D3P, • adición de filler D3F, • adición de puzolana de toba D3PZT, • adición de polvo de pulir D3PV, • adición de humo de sílice D3HS, • adición de puzolana de cantera D3PZC).



**Figura 6.25.-** Perfil de avance de los cloruros en las amasadas de la dosificación D4  
 (• patrón D4P=D4P4, • adición de filler D4F, • adición de puzolana de toba D4PZT, • adición de polvo de pulir D4PV, • adición de humo de sílice D4HS, • adición de puzolana de cantera D4PZC).

Los perfiles siguen una tendencia lineal en la variación del contenido de cloruros calculado como porcentaje sobre peso de muestra respecto a la

profundidad de penetración (mm). Aunque los perfiles están bastante solapados, se observa que los perfiles de las adiciones de la puzolana de toba y, sobretodo, el de humo de sílice, son los menores.

#### 6.4.6.2. Método multirégimen.

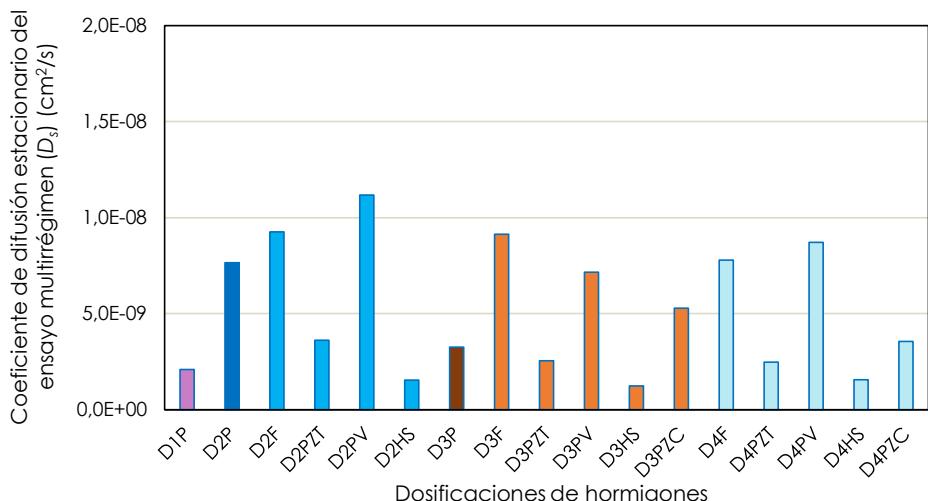
Este ensayo ha aportado datos sobre los coeficientes de difusión en los estados estacionario ( $D_s$ ) y no estacionario ( $D_{ns}$ ) de las diecisiete amasadas analizadas, resultados plasmados en la tabla 6.21 y las figuras 6.26 y 6.27. Así mismo en la tabla 6.21 se muestra la ecuación resultante de ajustar los datos a una recta según se ha descrito en el capítulo 3, apartado 3.2.10.2, figura 3.39.

En las tablas 6.22 y 6.23 se muestra los porcentajes de variación de los coeficientes de difusión las amasadas con respecto de las amasadas patrón.

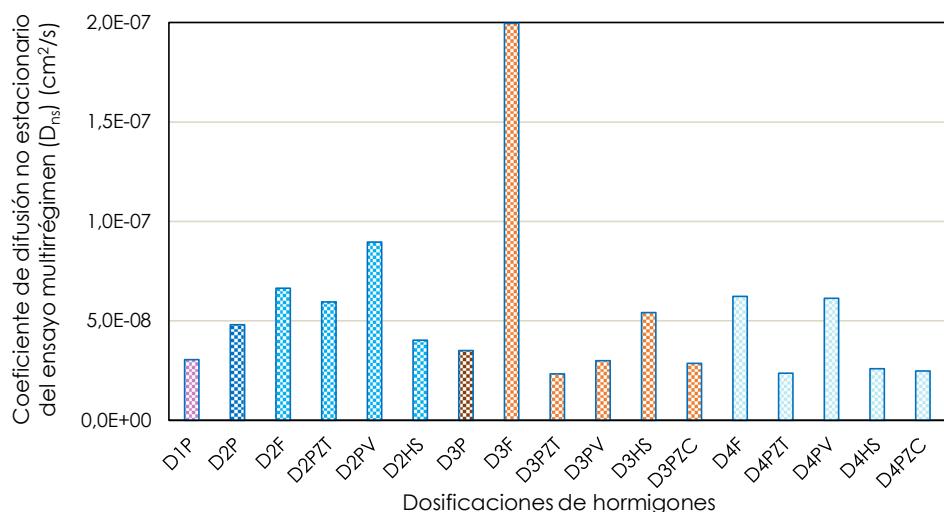
**Tabla 6.21.-** Coeficientes de difusión estacionario ( $D_s$ ) y no estacionario ( $D_{ns}$ ) de las muestras de hormigones dosificados y ecuación resultante del ajuste de los datos experimentales.

Muestra	$D_s$ ( $\times 10^{-9}$ ) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$D_{ns}$ ( $\times 10^{-8}$ ) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	Ecuación	$R^2$
D1P	2,0949	3,0516	$y = 9,2780 \cdot 10^{-9} - 1,8635 \cdot 10^{-2}$	0,9975
D2P	7,6557	4,8058	$y = 3,2015 \cdot 10^{-9} - 5,0128 \cdot 10^{-2}$	0,9960
D2F	9,2614	6,6414	$y = 4,0312 \cdot 10^{-9} - 5,0846 \cdot 10^{-2}$	0,9953
D2PZT	3,6185	5,9510	$y = 1,6248 \cdot 10^{-8} - 1,3213 \cdot 10^{-3}$	0,9936
D2PV	11,179	8,9613	$y = 4,4936 \cdot 10^{-8} - 3,2200 \cdot 10^{-2}$	0,9899
D2HS	1,5430	4,0285	$y = 7,3415 \cdot 10^{-9} - 7,1607 \cdot 10^{-3}$	0,9950
D3P	3,2596	3,5094	$y = 1,3003 \cdot 10^{-8} - 3,1254 \cdot 10^{-2}$	0,9461
D3F	9,1384	19,9512	$y = 3,1739 \cdot 10^{-8} - 4,8748 \cdot 10^{-2}$	0,9515
D3PZT	2,5508	2,3337	$y = 2,0832 \cdot 10^{-8} - 1,8949 \cdot 10^{-2}$	0,9857
D3PV	7,1619	2,9979	$y = 3,1424 \cdot 10^{-8} - 8,1792 \cdot 10^{-2}$	0,9917
D3HS	1,2404	5,4167	$y = 5,9822 \cdot 10^{-9} - 3,3622 \cdot 10^{-3}$	0,9962
D3PZC	5,2873	2,8636	$y = 2,3743 \cdot 10^{-8} - 2,4293 \cdot 10^{-2}$	0,9939
D4F	7,7914	6,2301	$y = 2,8241 \cdot 10^{-8} - 2,3126 \cdot 10^{-2}$	0,9921
D4PZT	2,4777	2,3694	$y = 1,0810 \cdot 10^{-8} - 2,9250 \cdot 10^{-2}$	0,9738
D4PV	8,7149	6,1341	$y = 3,3812 \cdot 10^{-8} - 2,4712 \cdot 10^{-2}$	0,9958
D4HS	1,5622	2,5947	$y = 7,1604 \cdot 10^{-9} - 1,1316 \cdot 10^{-2}$	0,9932
D4PZC	3,5562	2,4799	$y = 1,5757 \cdot 10^{-8} - 4,6276 \cdot 10^{-2}$	0,9798

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.26.-** Coeficiente de difusión estacionario ( $D_s$ ) de las amasadas dosificadas tras la realización del ensayo de multirregimen.



**Figura 6.27.-** Coeficiente de difusión no estacionario ( $D_{ns}$ ) de las amasadas dosificadas tras la realización del ensayo de multirregimen.

**Tabla 6.22.-** Porcentajes de variación de los coeficientes de difusión estacionario de las amasadas tras la realización del ensayo multirregimen.

<b>Coeficientes de difusión estacionario de las dosificaciones patrón (<math>D_s</math>) <math>\times 10^{-9}</math> (<math>\text{cm}^2/\text{s}</math>)</b>	<b>Porcentaje de variación de los coeficientes de difusión estacionario de los hormigones con adiciones (%)</b>				
D1P 2,0949	No se ha adicionado a la dosificación D1P				
D2P 7,6557	D2F 20,97	D2PZT -52,73	D2PV 46,02	D2HS -79,84	---
D3P 3,2596	D3F 180,35	D3PZT -21,75	D3PV 119,71	D3HS -61,95	D3PZC 62,21
D2P=P4D 7,6557	D4F 1,77	D4PZT -67,64	D4PV 13,83	D4HS -79,59	D4PZC -53,55

**Tabla 6.23.-** Porcentajes de variación de los coeficientes de difusión no estacionario de las amasadas tras la realización del ensayo multirregimen.

<b>Coeficientes de difusión no estacionario de las dosificaciones patrón (<math>D_{ns}</math>) <math>\times 10^{-8}</math> (<math>\text{cm}^2/\text{s}</math>)</b>	<b>Porcentaje de variación de los coeficientes de difusión no estacionario de los hormigones con adiciones (%)</b>				
D1P 3,0515	No se ha adicionado a la dosificación D1P				
D2P 4,8058	D2F 38,19	D2PZT 23,83	D2PV 86,47	D2HS -16,17	---
D3P 3,5094	D3F 468,51	D3PZT -33,50	D3PV -14,58	D3HS 54,35	D3PZC -18,40
D2P=P4D 4,8058	D4F 29,64	D4PZT -50,70	D4PV 27,64	D4HS -46,01	D4PZC -48,40

En función de los resultados mostrados tanto en la figura 6.26 como en la tabla 6.22, se observa que los coeficientes de difusión estacionario son de un orden de magnitud de  $10^{-9}(\text{cm}^2/\text{s})$ . La dosificación 1 (D1P), como cabía esperar, tiene el coeficiente de difusión estacionario más bajo de las tres amasadas patrón, que por orden de menor a mayor queda D1P, D3P, D2P=D4P. Se puede resaltar que en las tres dosificaciones se repite la misma circunstancia, que las amasadas dosificadas con la puzolana de toba (PZT) y el humo de sílice (HS) presentan coeficientes de difusión menores que sus respectivas amasadas patrón, resultando reducciones de los coeficientes de las amasadas con PZT entre un 21 y 67% y de HS entre 61 y 79%. La puzolana de cantera (PZC) sólo ha reducido el coeficiente de difusión estacionario en el caso de la dosificación 4. En mayor o menor medida, los otros dos materiales

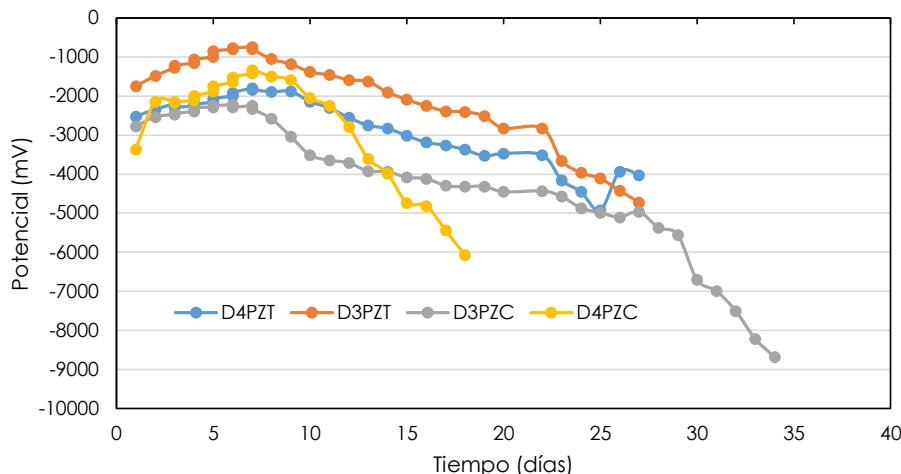
(filler y polvo de pulir) presentan coeficientes de difusión mayores que sus respectivas amasadas patrón, resaltando que las menores disminuciones y mayores aumentos de los coeficientes se ha dado en la dosificación 3 (D3) y las mayores disminuciones y menores aumentos en la dosificación 4 (D4).

Respecto a los resultados de los coeficientes de difusión no estacionarios, mostrados tanto en la figura 6.27 como en la tabla 6.23, se observa que son de un orden de magnitud de  $10^{-8}$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ). La dosificación 1 patrón (D1P), tiene el coeficiente de difusión no estacionario más bajo de las tres amasadas patrón, que por orden de menor a mayor queda D1P, D3P, D2P=D4P. En la dosificación 2, la amasada con humo de sílice (D2HS) es la única en la que disminuye el coeficiente de difusión no estacionario, mientras que en las dosificaciones 3 y 4, se repite la circunstancia de que las amasadas dosificadas con la puzolana de toba (PZT), puzolana de cantera (PZC) y el humo de sílice (HS) presentan coeficientes de difusión menores que sus respectivas amasadas patrón. El peor comportamiento lo ha presentado la amasada D3F, con un aumento de casi 470% y las mayores disminuciones de los coeficientes las han presentado las amasadas con PZT entre un 33 y 50%, la PZC entre un 18 y 48% y de HS entre un 16 y 46%. Las dosificaciones 4 (D4) han arrojado las mayores disminuciones y menores aumentos de los coeficientes de difusión no estacionario.

#### 6.4.6.3. Método integral acelerado.

Los ensayos de penetración de cloruros con el método integral acelerado nos permiten determinar el coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario de forma rápida, así como el tiempo transcurrido desde la construcción de la probeta y la despasivación de la armadura. En la figura 6.28 se muestra la variación de la tensión registrada durante el ensayo para cuatro dosificaciones adicionadas con puzolana de toba y puzolana de cantera. En la tabla 6.24 se muestran los valores de los coeficientes de difusión, así como el tiempo hasta la despasivación de las distintas probetas.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.28.-** Variación del potencial medio frente al tiempo en las probetas de hormigón con armadura.

**Tabla 6.24.-** Coeficientes de difusión para las 4 probetas analizadas.

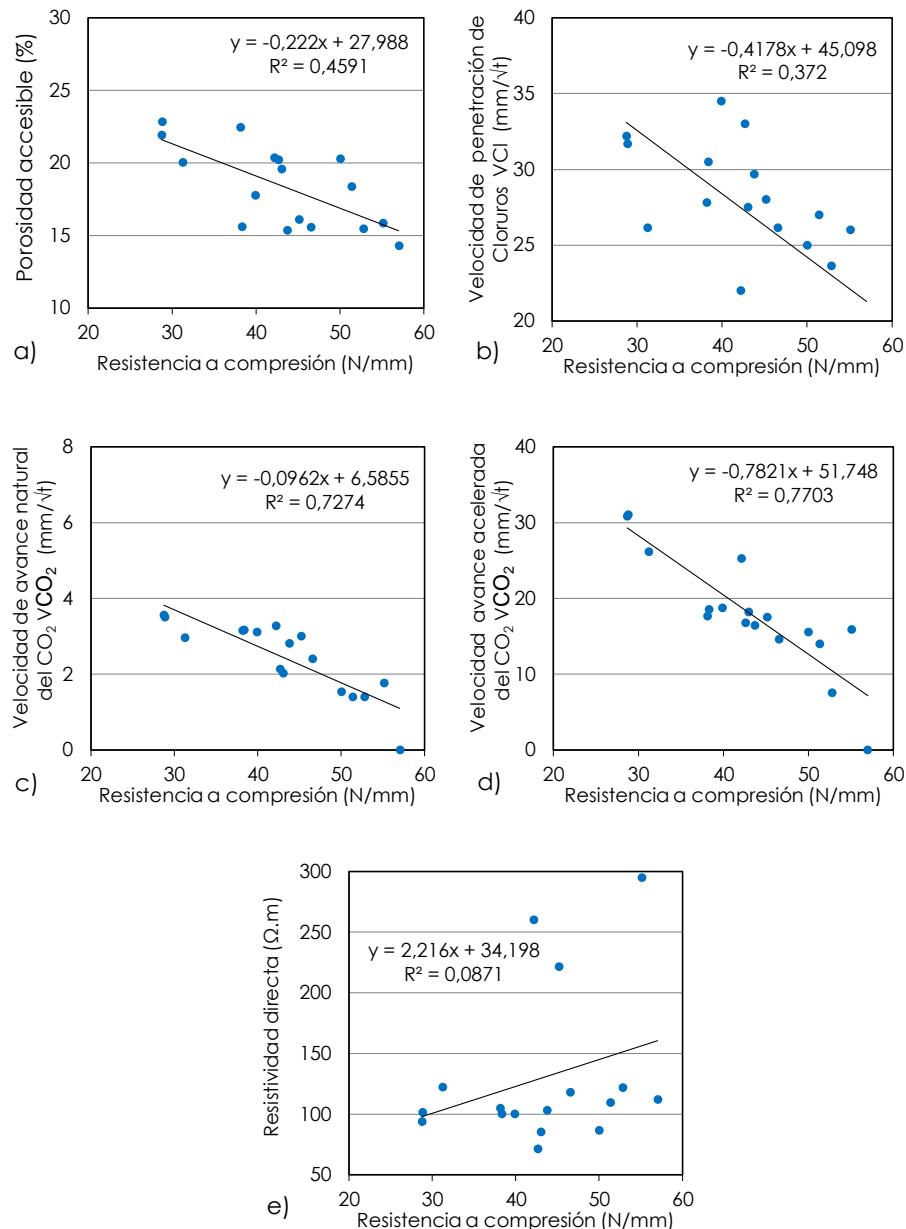
Muestra	D3PZT	D3PZC	D4PZT	D4PZC
Intensidad Inicial/final (A)	5,2/9,45	5,72/15,71	4,89/8,33	5,62/10,17
Resistencia Inicial/Final ( $\Omega$ )	2,307/1,270	2,098/0,764	2,045/1,440	2,135/1,180
Coeficiente difusión $D_{ns}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$4,019 \cdot 10^{-8}$	$3,191 \cdot 10^{-8}$	$4,019 \cdot 10^{-8}$	$6,028 \cdot 10^{-8}$
Tiempo hasta despasivación (s)	2332800	2937600	2332800	1555200

Al ser cuatro ensayos puntuales no se puede concluir mucho sobre el efecto que ejerce la adición respecto a la dosificación patrón. Lo que sí que nos permite visualizar este ensayo es que los coeficientes de difusión obtenidos son del mismo orden de magnitud que los obtenidos en con el método multirregimen, aunque aportando la información adicional sobre la despasivación de la armadura.

#### 6.4.7. Relación entre ensayos.

En la figura 6.29 se muestran varias gráficas donde se relacionan distintas variables que caracterizan el comportamiento de un hormigón, como son la porosidad accesible, la resistencia a la compresión, la resistividad, la velocidad de penetración de la carbonatación y de cloruros.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



**Figura 6.29.-** Relación entre el ensayo de la resistencia a compresión y a) porosidad accesible, b) velocidad de penetración de cloruros, c) velocidad de avance de la carbonatación natural, d) velocidad de avance de la carbonatación acelerada, e) resistividad.

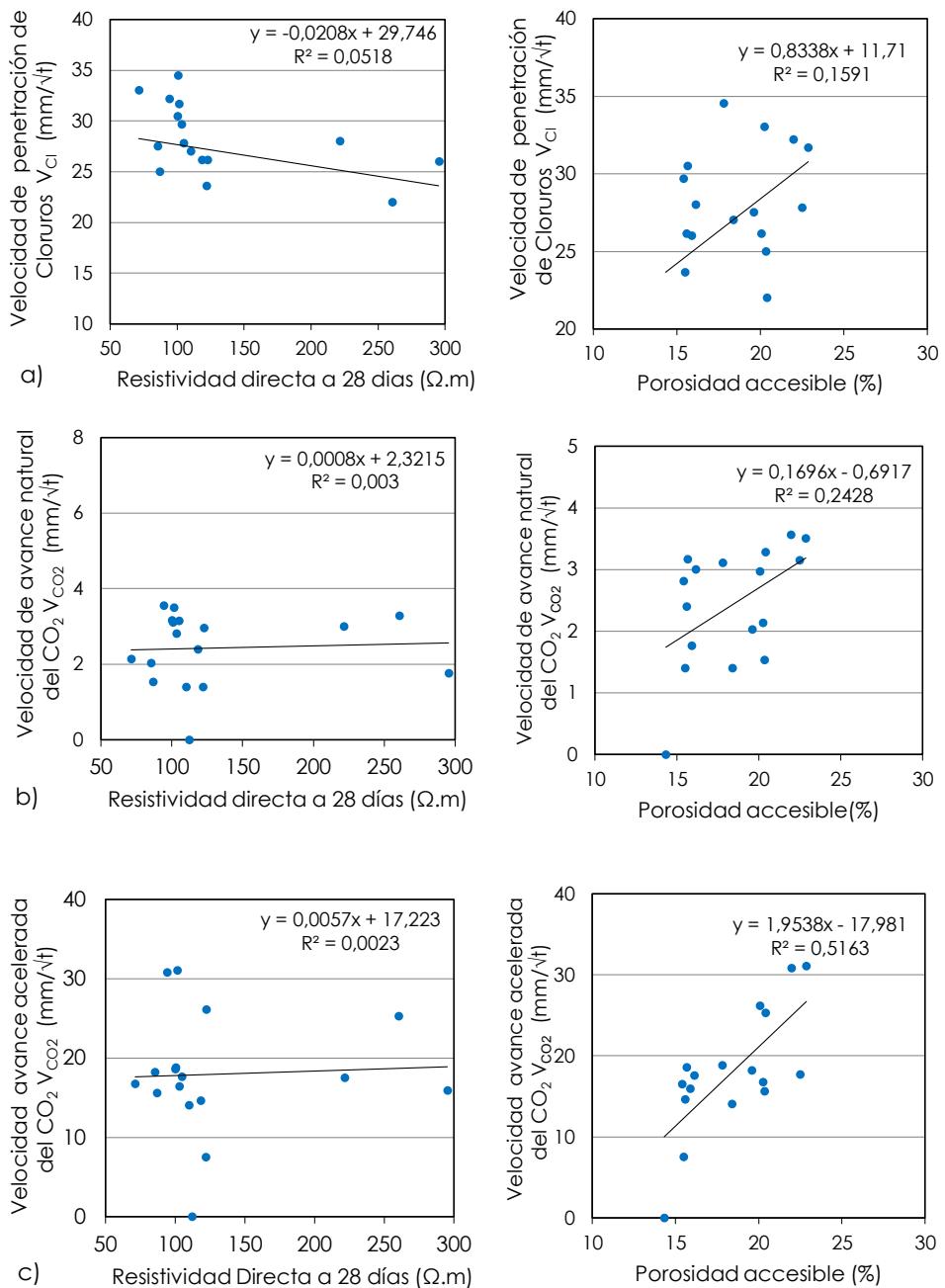
Según se desprende de la figura anterior, la dependencia entre la resistencia a la compresión y el resto de variables consideradas se puede aproximar a una línea recta con un grado de ajuste aceptable para los casos de porosidad y velocidad de penetración de agresivos. Se observa que al aumentar la porosidad accesible disminuye la resistencia a la compresión, la cual es una relación lógica y esperable. Un valor pequeño de resistencia a compresión implica un valor alto de porosidad.

La relación entre penetración de agresivos, como son el ion cloruro y el CO<sub>2</sub> atmosférico, provocando la carbonatación de la muestra, siguen una evolución semejante a la observada para la porosidad. Al ser la muestra más porosa, el impedimento a la penetración de dichos compuestos es menor, por lo que se verifica la misma relación que en el caso anterior, es decir, una mayor velocidad de penetración de agresivos a medida que disminuye la resistencia a la compresión de la muestra. Como cabría esperar, la resistividad de la probeta aumenta al disminuir la porosidad, por lo que la tendencia entre resistividad y resistencia a compresión sigue un comportamiento contrario al exhibido por las otras variables, es decir, se observa un aumento lineal de la resistividad con la resistencia a la compresión de las muestras, aunque esta relación no es tan evidente como en el caso de las anteriores variables.

Con la finalidad de esclarecer dichas relaciones, se ha procedido a intentar relacionar las velocidades de penetración de agresivos con la resistividad y la porosidad, obteniendo las gráficas mostradas en la figura 6.30. De dicha figura no se concluye una relación directa entre resistividad directa y la penetración de agresivos, lo cual concuerda con los resultados mostrados en la figura 6.29. Dado que no se aprecia una relación lineal entre resistividad y resistencia a compresión, relación que sí se verifica con la penetración de agresivos, es lógico esperar que no se obtenga una clara relación lineal entre penetración de agresivos y resistividad de las probetas.

Por otro lado, sí que se observa una clara relación lineal entre penetración de agresivos y porosidad, lo cual es un resultado lógico y esperable ya que la difusión de las especies agresivas se verá menos impedida en probetas más porosas.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		



**Figura 6.30.- Relación entre el ensayo de resistividad directa/porosidad accesible y**  
**a) velocidad de penetración de cloruros, b) velocidad de avance de la**  
**carbonatación natural y c) velocidad de avance de la carbonatación acelerada.**

La tabla 6.25 resume los resultados obtenidos de los distintos ensayos de las amasadas fabricadas con las tres dosificaciones, a las que se les ha incorporado los materiales estudiados, ya sean materiales incorporados como adición (D2 y D3) o como superfino (D4), respecto a sus amasadas patrón. Las flechas representadas y su color, nos ofrecen una amplia y rápida visión del efecto de los materiales sobre las distintas propiedades, al ser incorporados en cada amasada. Indicar que el sentido de la flecha hace alusión al aumento o disminución del valor de la propiedad y el rojo indica empeoramiento y verde mejora.

**Tabla 6.25.- Efecto de las adiciones en las amasadas dosificadas respecto a su respectiva dosificación patrón.**

Dosificaciones	D2				D3					D4					
	Materiales incorporados	F	PZT	PV	HS	F	PZT	PV	HS	PZC	F	PZT	PV	HS	PZC
Resistencia a compresión	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	=	↑	↑	↑	↑
Consistencia, cono Abrams	↓	↓	↓	↓	↓	↑	=	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑
Porosidad accesible	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓
Penetración de agua	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓
Resistividad directa	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓
Resistividad indirecta (RIC)	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	=	↑	↓	↑	↓
Velocidad de CO <sub>2</sub> natural	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	↑	↑	↑	=	↓	↓	↓	↓
Velocidad de CO <sub>2</sub> acelerada	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	=
V Penetración Cl <sup>-</sup> (piscina)	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	=	↑
Penetración piscina (D <sub>ns</sub> )	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↓
Multirregimen (D <sub>s</sub> )	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓
Multirregimen (D <sub>ns</sub> )	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓

Partimos de la base que la dosificación D2 es un hormigón patrón identificado como HA-25, con una cantidad mínima recomendada de cemento 300 kg/m<sup>3</sup>, una relación agua/cemento máxima de 0,73% y plastificantes, a la que en sus amasadas adicionadas se le han introducido los materiales estudiados como adiciones, es decir, restando un 20% de la cantidad de cemento. Vemos que en los hormigones adicionados D2PZT y D2HS, si bien no mejora en todas las propiedades sí que hay algunas mejoras como la bajada de porosidad accesible, subida de resistividad y bajada de penetración de cloruros, todo ello a pesar de que al verse reducida la cantidad de cemento hay menos material cementante para la reacción con las adiciones. A la vista de los resultados obtenidos, tanto la puzolana de toba como el humo de sílice se pueden introducir como adición ya que la resistencia a compresión está por encima de la resistencia característica exigida, aportando además mejoras en otras propiedades como las mencionadas anteriormente. El resto de materiales (filler, polvo de pulir y puzolana de cantera), si bien no aportan mejoras, desde un

punto de vista estrictamente mecánico sí pueden ser utilizadas como adiciones, ya que la resistencia a compresión está por encima de la exigida de 25 N/mm<sup>2</sup>.

La dosificación patrón D3 es un hormigón identificado como HA-30, con una cantidad mínima recomendada de cemento 300 kg/m<sup>3</sup> y una relación agua/cemento máxima de 0,56%, con la misma dosificación granulométrica que la dosificación D2, y donde para bajar la relación agua/cemento se ha añadido un superplastificante. En las amasadas adicionadas para la introducción de los materiales estudiados como adiciones, se ha restado su porcentaje, un 20% a la cantidad de cemento. En las amasadas de la dosificación D3 apreciamos que en los hormigones adicionados no se muestran grandes efectos positivos de las propiedades estudiadas. Sólo en las D3PZT y D3HS, se mejoran o igualan algunas propiedades. Pero a pesar de ello, debe observarse que todas las amasadas adicionadas D3 siguen cumpliendo con la resistencia característica mínima de 30 N/mm<sup>2</sup>, con lo que todos los materiales estudiados se pueden introducir en una dosificación normal de un hormigón.

La dosificación D4 ve mejorada casi todas sus propiedades con la introducción como superfino de los materiales seleccionados para este estudio, destacando la puzolana de toba (PZT) que mejora todas su propiedades, seguido del humo de sílice (HS) que las mejora a todas a excepción de su consistencia, medida por el cono de Abrams. Es decir, que para un hormigón patrón identificado como HA-25, con una cantidad mínima de cemento 300 kg/m<sup>3</sup> y una relación agua/cemento máxima de 0,73%, la introducción de los materiales estudiados como un árido superfino mejora la mayoría de sus características. Se nota, de forma generalizada en todas las amasadas, el efecto de aumento de la resistencia a compresión y consistencia, así como la disminución de la porosidad y de la penetración de agua. La puzolana de toba (PZT) y el humo de sílice (HS) aportan algunas mejoras distintivas, como el aumento de la resistividad y disminución de la velocidad de penetración de agresivos, cloruros y CO<sub>2</sub>. La puzolana de cantera (PZC) parece tener algún efecto positivo sobre los agresivos, mientras que con el filler y el polvo de pulir no es tan clara su contribución positiva. Todos los materiales estudiados pueden ser introducidos en el hormigón, e incluso algunos como la puzolana de toba y el humo de sílice otorgando mejoras. El resto de los materiales pueden ser adicionados como superfinos, ya que desde el punto de vista mecánico van a funcionar bien. Esta podría ser una forma de reciclar dichos materiales, ya que a priori todas las amasadas D4 cumplen con los requisitos requeridos de la resistencia característica mínima a compresión de 25 N/mm<sup>2</sup>.

En el caso de las tres dosificaciones (D2, D3 y D4), se observa que las amasadas a las que se ha incorporado el humo de sílice mejoran el resultado de la resistencia a compresión respecto a la patrón.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

## 6.5. Conclusiones.

### Morteros:

1. Todos los morteros fabricados con la dosificación tipo cumplen para la máxima resistencia a compresión exigida de morteros de albañilería Md ( $>25 \text{ N/mm}^2$ ). Los morteros fabricados con CEM II-A-P/42,5R presentan mayores valores de resistencia que los fabricados con CEM IV-A-P/32,5N.
2. Todas las adiciones efectuadas a los morteros provocan una disminución en la resistencia a la compresión, pero estando todos los valores por encima del valor máximo exigido a morteros para tabiquería, la máxima Md ( $>25 \text{ N/mm}^2$ ).
3. Las adiciones provocan un aumento en la porosidad de las muestras con respecto a la dosificación patrón, excepto cuando se adiciona puzolana de toba (PZT). Las probetas adicionadas con filler son las que presentan los mayores aumentos de porosidad, con incrementos de hasta un 20%.
4. El árido canario provoca un aumento en la porosidad con respecto a la arena ensacada normalizada.
5. Las adiciones provocan un aumento en la resistividad de las probetas con respecto a la dosificación patrón. En orden decreciente, la adición que provoca un mayor aumento es el humo de sílice, seguido de la puzolana de toba y, por último, el filler. Las probetas fabricadas con cemento tipo CEM IV dan mayores valores de resistividad en comparación con las elaboradas con CEM II.
6. Las adiciones provocan una mayor disminución en la velocidad y profundidad de penetración de cloruros cuando se combinan con arena ensacada que con arena normalizada. Las dosificaciones elaboradas con cemento tipo CEM II presentan niveles de velocidad y penetración de cloruros superiores a las elaboradas con CEM IV.
7. La puzolana de toba mejora las dosificaciones respecto a la dosificación patrón disminuyendo la velocidad y penetración de cloruros.
8. La velocidad de avance del frente de carbonatación se reduce con el tiempo de exposición. La carbonatación en las muestras patrón formuladas con cemento CEM II ha resultado ser inferiores a las muestras con CEM IV. A su vez, los morteros formulados con árido ensacado canario presentan un mayor frente de carbonatación que las muestras con árido normalizado. Todas las adiciones que provocan un aumento en la velocidad de carbonatación de las muestras empeorando su comportamiento.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Hormigones:**

1. Todas las amasadas de laboratorio, confeccionadas con los materiales estudiados, ya sean incorporados al hormigón como adiciones o como árido superfino, desde el punto de vista mecánico y según se puede apreciar en la figura 6.12, superan las líneas rojas que delimitan la resistencia característica mínima exigida de  $25 \text{ N/mm}^2$  en el caso de las dosificaciones D2 y D4 y de  $30 \text{ N/mm}^2$  en el caso de las dosificaciones D3.
2. La adición del humo de sílice genera en todos los casos un aumento en la resistencia a compresión respecto a la dosificación patrón. El resto de las adiciones presentan una disminución en la resistencia a compresión cuando su porcentaje es restado al del cemento. Pero si los materiales son incorporados como árido superfino (D4), manteniendo la proporción de cemento igual a la dosificación patrón, se observa un aumento en la resistencia a compresión, siendo dicho efecto mayor con la puzolana de toba, seguido en orden decreciente por el humo de sílice, la puzolana de cantera, el polvo de pulir y el filler.
3. Todas las adiciones superan el índice de actividad resistente al agua de mar (IAR), cumpliendo con una de las tres especificaciones de la norma UNE 80303-2:2001.
4. Todos los hormigones dosificados presentan consistencia entre plástica y líquida. Todas las amasadas adicionadas cambian su consistencia respecto de la patrón, por lo que se deduce que la introducción de los materiales estudiados influyen en la consistencia.
5. En las amasadas D2 bajan las consistencias, empeorando el asentamiento hasta 5 cm y en los casos de las amasadas D3 fluctúa en  $\pm 4 \text{ cm}$ , mientras que en la amasadas con las adiciones incorporadas como superfinales (D4), se aumenta la docilidad de la consistencia en hasta 6 cm, pero se mantienen en una consistencia fluida. Caso aparte, es el comportamiento de las amasadas dosificadas con humo de sílice en las que se observan las pérdidas de docilidad más acusadas.
6. Las amasadas de la dosificación D2 (alta relación agua/cemento) con adición de puzolana de toba y humo de sílice reducen la porosidad con respecto a la dosificación patrón en aproximadamente un 10%. En cambio, la dosificación D3, con una relación agua/cemento menor, en las amasadas con adiciones, las porosidades han aumentado, llegando en algunos casos hasta el 30% más de porosidad accesible. En cuanto a la dosificación D4, al mantener la cantidad de cemento e introducir las adiciones como un árido superfino, las porosidades se han visto reducidas en todos los casos entre un 20 y un 31%.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

7. Las dosificaciones donde se ha sustituido el cemento por la adición (dosificaciones D2 y D3) muestran un aumento en la penetración de agua con respecto a la dosificación patrón. Sin embargo, al ser sustituidos como árido superfino (D4), la penetración de agua se ve disminuida, sobre todo con las adiciones de puzolana de toba y de humo de sílice. Aunque hay que decir que ninguno de los hormigones fabricados son de exposición ambiental tipo III y IV, por lo que no tienen por qué cumplir esta exigencia.
8. Las dosificaciones adicionadas con filler, polvo de pulir y puzolana de cantera provocan un descenso en el valor de resistividad con respecto a la dosificación patrón mientras que aumenta en las adicionadas con puzolana de toba en las dosificaciones D2 y D4, y con humo de sílice (HS) en las tres dosificaciones en las que se emplea.
9. La puzolana de toba retrasa el proceso de carbonatación respecto a la dosificación patrón en todos los casos estudiados.
10. Las dosificaciones patrón D2P y D3P presentan avances de la carbonatación menores que sus amasadas adicionadas en la mayoría de los casos, con incrementos que oscilan entre el 4,16% para el humo de sílice al 52% con el filler.
11. En el caso de las dosificaciones D4, donde la adición no ha sido restada al cemento sino a los áridos como si fuera un superfino, las velocidades de carbonatación son aproximadamente igual a la amasada patrón e incluso menor, como en tres los casos D4PZT, D4PZC y D4HS.
12. Al realizar los ensayos de carbonatación acelerada se obtienen situaciones similares a las descritas para la carbonatación natural. El incremento en las velocidades de carbonatación respecto a las dosificaciones patrón son superiores en este caso, destacando que la puzolana de toba no frena el proceso de carbonatación cuando ésta es acelerada a excepción de cuando es adicionada como árido superfino.
13. Se observa una relación lineal entre los procesos de carbonatación natural y acelerada, lo que indica que la correlación entre ambas técnicas es independiente de la naturaleza de la muestra. El método de carbonatación acelerada arroja valores de velocidad de carbonatación 7,5 veces superiores a los obtenidos por exposición natural.
14. En el ensayo de penetración de cloruros por inmersión en piscina, las amasadas en las que se ha incorporado el filler, el polvo de pulir y puzolana de cantera presentan un aumento en la penetración de cloruros respecto a la dosificación patrón, mismo comportamiento observado para todas las dosificaciones. En las amasadas con puzolana de toba y humo de sílice la

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

velocidad de penetración de cloruros se ha visto reducida o igualada con respecto a la dosificación patrón.

15. El perfil de penetración de cloruros en las probetas inmersa en piscina se ajusta a una recta decreciente. Los coeficientes de difusión no estacionaria de cloruros se encuentran en el rango de entre 4 y  $9,2 \cdot 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s.
16. El método integral acelerado arroja valores de coeficientes de difusión del mismo orden de magnitud que los obtenidos con el método multirregimen, con la información adicional del tiempo de despasivación de la armadura.
17. Se observa una clara relación lineal entre los resultados de resistencia a compresión y la porosidad accesible con la velocidad de penetración de cloruros y velocidad de avance de la carbonatación obtenida tanto por exposición natural como acelerada.
18. La puzolana de toba y el humo de sílice mejoran algunas de las propiedades de las dosificaciones. El resto de los materiales pueden ser adicionados como superfinos ya que cumplen con el requisito mínimo de resistencia mecánica.

## 6.5. Referencias.

- [1] AENOR. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. UNE-EN 1015-11. AENOR, Madrid, 2001.
- [2] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. UNE 83988-2:2008. AENOR, Madrid, 2008.
- [3] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. UNE 83980. AENOR, Madrid, 2014.
- [4] AENOR. Ensayo de durabilidad del hormigón. Determinación de la difusión de iones cloruro. PrNE 83986:2009. AENOR, Madrid, 1º versión marzo, 2009.
- [5] CEN. Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. CEN/TS 12390-11:2010. Austrian Standards plus GmbH, Viena, 2010.
- [6] AENOR. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido. UNE-EN 14629:2007. AENOR, Madrid, 2007.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- [7] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural. UNE 83993-1. AENOR, Madrid, 2013.
- [8] AENOR. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:1994. AENOR, Madrid, 1994.
- [9] AENOR. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:2011. AENOR, Madrid, 1994.
- [10] AENOR. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería. UNE EN 998. AENOR, Madrid, 2012
- [11] AENOR. Cementos con características adicionales. Parte 2: Cementos resistentes al agua de mar. UNE 80303. AENOR, Madrid, 2001.
- [12] AENOR. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. UNE-EN 196-1. AENOR, Madrid, 2005.
- [13] Ministerio de presidencia, REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.
- [14] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. UNE 83988-2:2008. AENOR, Madrid, 2008.
- [15] W. Morris, E.I. Moreno, Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe, Cem. Concr. Res. 26 (12) (1996) 1779-1787.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 6

---

226

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

# Capítulo 7

Análisis de la durabilidad de las  
amasadas de hormigón con  
adiciones, según la modelización  
de la EHE-08

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Fecha: 08/06/2017 19:16:00

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ERNESTO PEREDA DE PABLO  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2017 19:40:53

09/06/2017 11:30:19

28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS DE HORMIGÓN CON ADICIONES, SEGÚN LA MODELIZACIÓN DE LA EHE-08.**

### **ÍNDICE**

<b>7. ANÁLISIS DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS DE HORMIGÓN CON ADICIONES, SEGÚN LA MODELIZACIÓN DE LA EHE-08.....</b>	<b>229</b>
<b>    7.1. Introducción .....</b>	<b>229</b>
<b>    7.2. Cálculos relativos al Estado Límite de durabilidad .....</b>	<b>229</b>
<b>    7.3. Método general de cálculo.....</b>	<b>230</b>
<b>    7.4. Modelos de durabilidad para los procesos de corrosión .....</b>	<b>230</b>
7.4.1. Generalidades.....	230
7.4.2. Período de iniciación .....	231
7.4.2.1. Modelo de carbonatación .....	231
7.4.2.2. Modelo de penetración de cloruros.....	233
7.4.3. Período de propagación.....	235
7.4.4. Estimación de la vida útil debido a la corrosión de las armaduras .....	235
<b>    7.5. Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras.....</b>	<b>236</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**7.6. Resultados de la aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión .....238**

- 7.6.1. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante el modelo de carbonatación .....239
- 7.6.2. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante el modelo de penetración de cloruros .....242

**7.7. Conclusiones .....245**

**7.8. Referencias .....245**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 7 - ANÁLISIS DE LA DURABILIDAD DE LAS AMASADAS DE HORMIGÓN CON ADICIONES, SEGÚN LA MODELIZACIÓN DE LA EHE-08.

### 7.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a la hora de evaluar la durabilidad de las distintas dosificaciones según las indicaciones de la EHE-08 contenidas en su Anejo 9 y reflejado en los apartados siguientes.

### 7.2. Cálculos relativos al Estado Límite de durabilidad.

Se entiende por Estado Límite de durabilidad el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada [1].

Para la comprobación del Estado Límite de durabilidad, la Instrucción EHE-08 [1] contempla un procedimiento de carácter semiprobabilista de forma análoga al adoptado para el resto de los Estados Límite.

En la comprobación del Estado Límite, se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d \quad (7.1)$$

donde:

- $t_L$  es el valor estimado de la vida útil.
- $t_d$  es el valor de cálculo de la vida útil.

Se define la vida útil de cálculo, como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad:

$$t_d = \gamma_f \cdot t_g \quad (7.2)$$

donde:

- $t_d$  es la vida útil de cálculo.
- $\gamma_f$  es el coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará  $\gamma_f = 1,10$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- $t_g$  es la vida útil de Proyecto.

### 7.3. Método general de cálculo.

El método general de cálculo comprende las siguientes fases:

1. Elección de la vida útil de proyecto, según apartado 5.1 de la EHE-08.
2. Elección del coeficiente de seguridad de vida útil.
3. Identificación de las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura. Para cada clase, identificación del proceso de degradación predominante.
4. Selección del modelo de durabilidad correspondiente a cada proceso de degradación. El apartado 7.4 de este capítulo recoge algunos de los modelos aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras.
5. Aplicación del modelo y estimación de la vida de servicio de la estructura  $t_L$ .
6. Comprobación del Estado Límite para cada uno de los procesos de degradación identificados relevantes para la durabilidad de la estructura.

### 7.4. Modelos de durabilidad para los procesos de corrosión.

#### 7.4.1. Generalidades.

En el caso de la corrosión, tanto por carbonatación como por cloruros, el tiempo total  $t_L$  necesario para que el ataque o degradación sean significativos se puede expresar como:

$$t_L = t_i + t_p \quad (7.3)$$

donde:

- $t_i$  es el período de iniciación de la corrosión, entendido como el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura provocando el inicio de la corrosión.
- $t_p$  es el período de propagación (tiempo de propagación de la corrosión hasta que se produzca una degradación significativa del elemento estructural).

Este apartado recoge algunos de los modelos aplicables para la estimación del desarrollo de los procesos de deterioro relacionados con la corrosión de las

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

armaduras. El Autor del proyecto podrá optar por cualquier otro modelo avalado por la bibliografía especializada.

En el caso de comprobación del Estado Límite en el caso de armaduras activas, se considerará un período de propagación,  $t_p=0$ .

En el caso de armaduras activas postesas, con trazados que sean conformes con los recubrimientos mínimos establecidos en el articulado, no suele ser necesaria la comprobación de este Estado Límite.

#### 7.4.2. Período de iniciación.

Tanto la carbonatación como la penetración de cloruros son procesos de difusión en el hormigón a través de sus poros, que pueden ser modelizados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d_p = K \cdot \sqrt{t} \quad (7.4)$$

donde:

- $d_p$  es la profundidad de penetración del agresivo, para una edad  $t$ .
- $K$  es el coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales.

##### 7.4.2.1. Modelo de carbonatación.

El período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia  $d$  respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la siguiente expresión:

$$t = \left( \frac{d_p}{K_c} \right)^2 \quad (7.5)$$

donde:

- $d_p$  es la profundidad (mm).
- $t$  es el tiempo (años).

El coeficiente de carbonatación  $K_c$  puede obtenerse como:

$$K_c = C_{env} \cdot C_{air} \cdot \alpha' \cdot f_{cm}^b \quad (7.6)$$

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

donde:

- $f_{cm}$  es la resistencia media del hormigón a compresión ( $\text{N/mm}^2$ ) que puede estimarse a partir de la Resistencia característica especificada ( $f_{ck}$ ).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (7.7)$$

- $C_{env}$  es el coeficiente de ambiente, según la tabla 7.1.
- $C_{air}$  es el coeficiente de aireantes, según la tabla 7.2.
- $a'$  y  $b'$  son parámetros función del tipo de conglomerante, según la tabla 7.3.

**Tabla 7.1.-** Coeficiente  $C_{env}$ .

Ambiente	$C_{env}$
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5

**Tabla 7.2.-** Coeficiente  $C_{air}$ .

Aire ocluido (%)	$C_{air}$
< 4,5%	1
≥ 4,5%	0,7

**Tabla 7.3.-** Coeficientes  $a'$  y  $b'$ .

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	$a'$	$b'$
Cemento Portland	CEM I		
	CEM II/A		
	CEM II/B-S		
	CEM II/B-L	1800	-1,7
	CEM II/B-LL		
	CEM II/B-M		
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	CEM/V		
	CEM II/B-P		
	CEM II/B-V	360	-1,2
	CEM IV/A		
	CEM IV/B		
Cemento Portland + 9% humo de sílice	CEM II/A-D	400	-1,2
Cemento Portland + 65% escorias	CEM III/A		
	CEM III/B	360	-1,2

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

#### 7.4.2.2. Modelo de penetración de cloruros.

El período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros  $C_{th}$  a una distancia  $d$  respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la siguiente expresión:

$$t = \left( \frac{d_p}{K_{Cl}} \right)^2 \quad (7.8)$$

donde:

- $d_p$  es la profundidad (mm).
- $t$  es el tiempo (años).

El coeficiente de penetración de cloruros  $K_{Cl}$  tiene la siguiente expresión:

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left( 1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right) \quad (7.9)$$

donde:

- $\alpha$  es el factor de conversión de unidades que vale 56157.
- $D(t)$  es el coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad  $t$ , expresado en  $\text{cm}^2/\text{s}$ .
- $C_{th}$  es la concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento.
- $C_s$  es la concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % en peso de hormigón, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) como:

$$C_s (\% \text{ peso de cemento}) = C_s (\% \text{ peso de hormigón}) \cdot (2300 / \text{contenido de cemento})$$

- $C_b$  es el contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón.

El coeficiente de difusión de cloruros varía con la edad del hormigón de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D(t) = D(t_0) \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad (7.10)$$

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

donde  $D(t_0)$  es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t_0$ ,  $D(t)$  el coeficiente a la edad  $t$ , y  $n$  es el factor de edad, que puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, igual a 0,5.

Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de  $D(t_0)$  obtenido mediante ensayos específicos de difusión (en cuyo caso  $t_0$  sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la siguiente tabla (obtenidos para  $t_0 = 0,0767$ )

**Tabla 7.4.-** Coeficientes  $D(t_0)$  ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Tipo de cemento	$a/c = 0,40$	$a/c = 0,45$	$a/c = 0,50$	$a/c = 0,55$	$a/c = 0,60$
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

La concentración crítica de cloruros ( $C_{th}$ ) deberá ser establecida por el autor del proyecto de acuerdo con las consideraciones específicas de la estructura. En condiciones normales, puede adoptarse un valor del 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado Límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas pretesadas, puede adoptarse un valor límite de  $C_{th}$  de 0,3% del peso de cemento.

El valor de  $C_s$  depende de las condiciones externas, especialmente de la orografía del terreno y el régimen de vientos predominantes en la zona, en el caso de ambientes próximos a la costa. Además,  $C_s$  varía con la edad del hormigón, alcanzando su valor máximo a los 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de hormigón situadas en las proximidades, el Autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de  $C_s$  de acuerdo con tabla 7.5, en función de la clase general de exposición, según 8.2.2 de la EHE-08:

**Tabla 7.5.-** Concentración de cloruros en la superficie de hormigón.

Clase general de exposición	IIIa	IIIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa	Hasta 500 m	500m – 5000m	Cualquiera	---
$C_s$ (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,50

En el caso de que  $C_{th}-C_b>C_s$ , se considerará comprobado el Estado Límite sin

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

necesidad de efectuar ninguna comprobación numérica.

#### 7.4.3. Período de propagación.

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisible o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El período de tiempo para que se produzca puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80}{\phi} \frac{d_r}{V_{corr}} \quad (7.11)$$

donde:

- $t_p$  es el tiempo de propagación (años).
- $d_r$  es el espesor de recubrimiento (mm).
- $\phi$  es el diámetro de la armadura (mm).
- $V_{corr}$  es la velocidad de corrosión ( $\mu\text{m/año}$ ).

A falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la tabla 7.6.

**Tabla 7.6.-** Velocidad de corrosión  $V_{corr}$  según la clase general de exposición.

Clase general de exposición		$V_{corr}$ ( $\mu\text{m/año}$ )	
Normal	Humedad alta	IIa	3
	Humedad media	IIb	2
	Aérea	IIIa	20
Marina	Sumergida	IIIb	4
	En zona de mareas	IIIc	50
	Con cloruros de origen diferente del medio marino	IV	20

#### 7.4.4. Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras.

Por tanto, el tiempo total, suma del período de iniciación y el de propagación de la corrosión, será, en el caso de la corrosión por carbonatación:

$$t_L = t_i + t_p = \left( \frac{d_p}{K_c} \right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d_r}{V_{corr}} \quad (7.12)$$

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

En el caso de la corrosión por cloruros será:

$$t_L = t_i + t_p = \left( \frac{d_p}{K} \right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d_r}{V_{corr}} \quad (7.13)$$

### 7.5. Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras.

El articulado de la EHE-08 permite tener en cuenta la contribución de revestimientos que sean compactos impermeables, definitivos y permanentes. A este respecto, en las clases generales de exposición IIa, IIb y IIIa, sin clase específica de exposición, pueden emplearse diversas alternativas. En el caso de uso de morteros de revestimiento, se define como "factor de equivalencia de recubrimiento ( $\lambda$ )" el valor por el que hay que multiplicar el espesor colocado de mortero para determinar el recubrimiento equivalente que puede sumarse al recubrimiento real de hormigón. Las tablas 7.7 y 7.8 presentan los valores de  $\lambda$  para los ambientes más habituales en el caso de estructuras de edificación. En ningún caso, podrán emplearse espesores de revestimiento superiores a 20 mm.

**Tabla 7.7.-** Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambientes IIa y IIb.

Velocidad de carbonatación, (mm/día <sup>1/2</sup> )	$\lambda$
≤ 2,0	0,5
≤ 1,0	1,0
≤ 0,7	1,5
≤ 0,5	2,0

**Tabla 7.8.-** Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa.

Velocidad de penetración de cloruros, (mm/día <sup>1/2</sup> )(*)	$\lambda$
≤ 3,4	0,5
≤ 1,7	1,0
≤ 1,1	1,5
≤ 0,9	2,0

(\*) Para la determinación de la velocidad de penetración de cloruros, y a falta de una normativa específica, se recomienda seguir las condiciones de ensayo descritas en el capítulo 3 de la norma AASTHO T259-80, manteniendo las mismas hasta edades no inferiores a 90 días y determinando la velocidad de penetración de cloruros mediante algún procedimiento adecuado (como por ejemplo, mediante la determinación colorimétrica del frente de penetración de cloruros con AgNO<sub>3</sub>, a diferentes edades intermedias).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento: 927280		Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00	
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53	
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19	
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04	

Alternativamente, para el ambiente IIIa puede emplearse también el criterio de factor de equivalencia establecido en la tabla 7.9.

**Tabla 7.9.-** Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa.

Capilaridad (kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )) según Recomendación RILEM CPC 11.2.	λ
≤ 0,40	0,5
≤ 0,20	1,0
≤ 0,15	1,5
≤ 0,10	2,0

Para que un mortero pueda ser empleado de acuerdo con lo indicado en este Artículo, sus componentes (cemento, áridos, aditivos, adiciones, etc.) deberán cumplir, en su caso, lo especificado para cada uno de ellos en la presente Instrucción. Además, independientemente del valor de su factor de equivalencia, deberá cumplir también las especificaciones de la tabla 7.10.

**Tabla 7.10.-** Características del mortero a emplear en revestimientos, para poder ser considerado a los efectos de este Anexo.

Característica	Requisito
Resistencia a flexotracción, según UNE-EN 1015-11	≥ 2 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad , según ASTM C 469	≤ 25000 N/mm <sup>2</sup>
Retracción de secado, a los 28 días, según ASTM C157	≤ 0,04%
Resistencia de adherencia, según UNE-EN 1542	≥ 0,8 N/mm <sup>2</sup>
Coeficiente de dilatación térmica, según UNE-EN 1770	≤ 11,7 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>

En el caso de empleo de otros revestimientos, o en ambientes distintos de los anteriores, el proyectista debe justificar documentalmente que la protección a las armaduras en el elemento prefabricado es similar a la que proporcionaría el espesor de hormigón sustituido. Para ello el fabricante de productos de revestimientos distintos de los anteriores deberá garantizar documentalmente sus prestaciones y entre ellas, al menos el factor de equivalencia del revestimiento.

Los requisitos del articulado corresponden estrictamente a exigencias de durabilidad del forjado. Otros criterios, como, por ejemplo, los estéticos o los de protección contra el fuego, pueden requerir mayores espesores de recubrimiento o la aplicación de otras protecciones específicas.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

En el caso de ambientes fuertemente agresivos, el valor de los recubrimientos y las demás disposiciones de proyecto deberán establecerse, previa consulta de la literatura técnica especializada, en función de la naturaleza del ambiente, del tipo de elemento estructural de que se trate, etc.

### **7.6. Resultados de la aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión.**

En este apartado se muestran los resultados de la aplicación de los modelos de durabilidad para la corrosión contenidos en la EHE-08, teniendo en cuenta tanto los efectos provocados por el proceso de carbonatación como por el de penetración de cloruros.

Para el cálculo de los modelos de iniciación y propagación y así poder predecir la vida útil en fase de proyecto se tomaron las siguientes consideraciones en la adopción de datos de partida para ciertos valores, mantenidos de forma constante para todos los casos:

- La estructura analizada se cataloga como de una vivienda, cuyo valor mínimo requerido de vida útil de proyecto ( $t_g$ ) es de 50 años.
- La vida útil de cálculo ( $t_d$ ) es de 55 años, según la ecuación (7.2).
- El diámetro de la barra de acero (genérica) se toma de  $\phi = 12$  mm.
- El recubrimiento de la barra de acero ( $d_r$ ), establecida según la tabla 37.2.4.1. a' y b' de la EHE-08, donde vienen establecidos los recubrimientos mínimos, en función de los tipos de ambientes será:
  - o Para un ambiente IIa, con cementos, adiciones y resistencia característica entre 25 y 40 N/mm<sup>2</sup>, el recubrimiento mínimo será de 20 mm.
  - o Para un ambiente IIb, con cementos, adiciones y resistencia característica entre 25 y 40 N/mm<sup>2</sup>, el recubrimiento mínimo será de 25 mm.
  - o Para un ambiente IIIa y nuestro tipo de cemento y vida útil de proyecto de 50 años, el recubrimiento mínimo será de 45 mm.
- Como coeficiente de ambiente se ha seleccionado el más desfavorable, de la tabla 7.1, correspondiente a "ambiente protegido de la lluvia", adoptando el valor de  $C_{env}=1$ .
- El coeficiente de aireantes, para <4,5% de aire ocluido, adopta el valor de  $C_{air}=1$  (tabla 7.2).
- Contenido de cloruros aportados por las materias primas,  $C_b=0$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

- La concentración crítica ( $C_{th}$ ), expresada en porcentaje en peso de cemento, considerada en la EHE-08 es de 0,6%, mientras que para nuestras muestras de ensayo por el método del ensayo de piscina es de 0,4%.
- Los demás datos de las muestras ensayadas como: tipos de hormigón, ambiente, relación agua/cemento, cantidad de cemento, necesarias para el cálculo de los modelos se encuentran recogidas tanto en la tabla 3.16 y 6.9 como en el Anexo III.

#### **7.6.1. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante el modelo de carbonatación.**

Se observa que, en el modelo de la carbonatación de la EHE-08 (ecuaciones (7.5) y (7.6)), la durabilidad se apoya en parámetros en base a los coeficientes ambientales y aireantes (planteados como fijos para toda la comparativa de nuestros casos), la resistencia y el conglomerante. Si hacemos hincapié en estos dos últimos, por una parte, nos encontramos que no todos los cementos existentes según RC-08 [2] se encuentran recogidos en el listado del Anejo de durabilidad objeto de aplicación, como es el caso del cemento (II/A-P/45,5 R/MR) utilizado en las dosificaciones de las muestras ensayadas. Esto nos ha llevado, en nuestro objetivo de evaluar la durabilidad, a duplicar las tablas de resultados, entendiendo que nuestro cemento podría estar encuadrado en el modelo como conglomerante cemento Portland o cemento Portland + 28% cenizas volantes y, por otro lado, comparar la diferencia de utilizar como resistencia característica  $f_{ck}+8$  (ecuación (7.7)) o la resistencia media del hormigón a compresión  $f_{cm}$ , determinada experimentalmente.

En la tabla 7.11 se plantean los resultados de las tres dosificaciones estudiadas, a las que se le ha aplicado el modelo de durabilidad para los procesos de corrosión, partiendo de la carbonatación como proceso para el período de iniciación, con los datos directos aportados por la de la EHE-08 para cada caso. Para la variable del tipo de conglomerante cemento Portland (tabla 7.3) y tomando como dato de resistencia la característica  $f_{ck}+8$ .

**Tabla 7.11.-** Aplicación del modelo de carbonatación para método general de cálculo para la vida útil, modelo de carbonatación, con los datos de la EHE-08 ( $f_{ck}+8$  y coeficientes del conglomerante  $a' = 1800$  y  $b' = -1,7$ ).

Muestra	$f_{ck}+8$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_c$	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{cor}$ (μm/año)	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L = t_i+t_p$ )
D1	43	3,01	99,42	45	20	15	114,42
D2	33	4,72	40,42	20	3	44,44	84,87
D3	38	3,71	65,31	25	2	83,33	148,64

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

En la tabla 7.12 se plantean los resultados de aplicar el modelo de durabilidad para los procesos de corrosión, partiendo de la carbonatación como proceso para el período de iniciación, con los datos directos aportados por la EHE-08 para la variable del tipo de conglomerante cemento Portland + 28% de cenizas volantes (tabla 7.3) y tomando como dato de resistencia la característica  $f_{ck}+8$ .

**Tabla 7.12.-** Aplicación del modelo de carbonatación para método general de cálculo para la vida útil, modelo de carbonatación, con los datos de la EHE-08 ( $f_{ck}+8$  y coeficientes del conglomerante  $a' = 360$  y  $b' = -1,2$ ).

Muestra	$f_{ck}+8$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_c$	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{cor}$ (μm/año)	$t_p$ (año)	$t_L$ (años) ( $t_L = t_i + t_p$ )
D1	43	3,95	57,80	45	20	15	72,80
D2	33	5,42	30,62	20	3	44,44	75,07
D3	38	4,58	42,97	25	2	83,33	126,30

Las tablas 7.11 y 7.12 muestran valores estimados de la vida útil ( $t_L$ ) del mismo orden de magnitud para las tres dosificaciones tipo, que han sido modelizadas directamente con los valores recogidos por el Anejo de durabilidad (cada una según sus condiciones específicas). Los resultados obtenidos superan ampliamente al valor de cálculo ( $t_d$ ) establecido en 55 años. Las tres dosificaciones tipo son adecuadas para su uso y condiciones de elemento constructivo planteado, siendo la dosificación D3 (HA-30/20/F/IIb) la más durable para el modelo, seguida de la D1 (HA-35/20/P/IIIa).

Como segunda propuesta, se introducen en el modelo de carbonatación (ecuación (7.5)), los resultados de los ensayos de las tres dosificaciones estudiadas y sus correspondientes amasadas adicionadas y datos aportados por la EHE-08 para cada caso. Para la variable del dato de la resistencia se ha cogido la resistencia media  $f_{cm}$  de rotura a compresión de cada amasada y para la catalogación del tipo de conglomerante, se han contemplado tres opciones: como Cemento Portland, Cemento Portland + 28% de cenizas volantes o Cemento Portland + 9% humo de sílice (tabla 7.3).

En las tablas 7.13, 7.14 y 7.15 se recogen una amplia gama de datos de la modelización al aplicar esta última propuesta. En dichas tablas se observa que se vuelve a cumplir que todos valores estimados de la vida útil ( $t_L$ ) obtenidos superan ampliamente al valor de cálculo ( $t_d$ ) establecido en 55 años. La tabla 7.13 contiene las tres amasadas de humo de sílice, catalogando el conglomerante como Portland + 9% de humo de sílice. Se observa que la dosificación D3HS establece la mayor amplitud de vida útil, en cambio D2HS establece la menor durabilidad, que se ve mejorada al incorporar el humo de sílice como árido superfino.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 7.13.-** Aplicación del modelo de carbonatación para el método general de cálculo para la vida útil, con los datos de la EHE-08 fijos, para el parámetro por el tipo de conglomerante Cemento Portland + 9% humo de sílice ( $a' = 400$  y  $b' = -1,2$ ) y tomando como dato de resistencia la media del hormigón ( $f_{cm}$ ).

Muestra	$f_{cm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_c$	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{corr}$ (μm/año)	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L=t_i+t_p$ )
D2HS	42,15	4,49	44,63	20	3	44,44	89,08
D3HS	55,08	3,26	84,82	25	2	83,33	168,16
D4HS	45,14	4,14	52,61	20	3	44,44	97,05

**Tabla 7.14.-** Aplicación del modelo de carbonatación para el método general de cálculo para la vida útil, con el tipo de conglomerante Cemento Portland ( $a' = 1800$  y  $b' = -1,7$ ) con los datos extraídos de las amasadas y de la resistencia la media del hormigón ( $f_{cm}$ ).

Muestra	$f_{cm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_c$	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{corr}$ (μm/año)	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L=t_i+t_p$ )
D1P	57,00	1,86	259,22	45	20	15	274,22
D2P	38,14	3,69	66,13	20	3	44,44	110,57
D2F	28,81	5,94	25,48	20	3	44,44	69,92
D2PZT	31,22	5,18	33,48	20	3	44,44	77,92
D2PV	28,71	5,98	25,18	20	3	44,44	69,62
D3P	52,79	2,12	199,70	25	2	83,33	283,03
D3F	42,65	3,05	96,70	25	2	83,33	180,03
D3PZT	51,34	2,23	181,66	25	2	83,33	264,99
D3PV	43,00	3,01	99,42	25	2	83,33	182,76
D3PZC	50,00	2,33	166,03	25	2	83,33	249,37
D4F	38,32	3,66	67,20	20	3	44,44	111,64
D4PZT	46,54	2,63	130,11	20	3	44,44	174,55
D4PV	39,87	3,42	76,89	20	3	44,44	121,34
D4PZC	43,72	2,92	105,20	20	3	44,44	149,64

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 7.15.-** Aplicación del modelo de carbonatación para el método general de cálculo para la vida útil, con los datos de la EHE-08 fijos, para el parámetro por el tipo de conglomerante cemento Portland + 28% cenizas volantes ( $a' = 360$  y  $b' = -1,2$ ) y tomando como dato de resistencia la media del hormigón ( $f_{cm}$ ).

Muestra	$f_{cm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_c$	$t_i$ (años)	$d_f$ (mm)	$V_{cor}$ (μm/año)	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L=t_i+t_p$ )
D1P	57	2,81	113,69	45	20	15	128,69
D2P	38,14	4,56	43,35	20	3	44,44	87,79
D2F	28,81	6,38	22,11	20	3	44,44	66,55
D2PZT	31,22	5,79	26,81	20	3	44,44	71,25
D2PV	28,71	6,41	21,92	20	3	44,44	66,37
D3P	52,79	3,08	94,57	25	2	83,33	177,91
D3F	42,65	3,98	56,68	25	2	83,33	140,02
D3PZT	51,34	3,19	88,46	25	2	83,33	171,79
D3PV	43	3,95	57,80	25	2	83,33	141,14
D3PZC	50	3,29	83,02	25	2	83,33	166,35
D4F	38,32	4,53	43,84	20	3	44,44	88,28
D4PZT	46,54	3,59	69,89	20	3	44,44	114,34
D4PV	39,87	4,32	48,22	20	3	44,44	92,66
D4PZC	43,72	3,87	60,15	20	3	44,44	104,60

Las tablas 7.14 y 7.15 presentan los valores de las amasadas dosificadas con los distintos materiales incorporados de manera que si comparamos sólo las amasadas patrón D2P y D3P observamos la gran influencia en el resultado de usar el resultado de la resistencia media de las muestras, aumentando el tiempo de vida útil. Respecto al enfoque de catalogar al conglomerante en las distintas amasadas, parece que la elección del cemento Portland +28% de cenizas en la modelización, son los más conservadores, aunque arrojando valores superiores a los de la vida útil de cálculo.

Según el modelo, la dosificación D2 es la más sensible a la carbonatación, los cuales son mejorados en años de vida útil por los resultados de las amasadas de la dosificación D4. De entre todas las dosificaciones amasadas, las que incorporan el filler (F) y el polvo de pulir (PV) son las menos longevas y las que contienen las puzolanas de cantera (PZC) y sobre todo la puzolana de toba (PZT) presentan las predicciones de vida útil más optimistas.

### 7.6.2. Análisis de los resultados de aplicación de los modelos de durabilidad para los procesos de corrosión, mediante penetración de cloruros.

En este apartado se presentan los datos del modelo de la penetración de cloruros de la EHE-08 (ecuaciones (7.8) y (7.9)), donde se valoran los resultados de la introducción del coeficiente de difusión, la concentración de cloruros en la superficie

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

y concentración crítica, con los datos ofrecidos por la EHE-08 y los datos del ensayo de penetración de cloruros por inmersión en piscina.

En la tabla 7.16 aporta los datos del cálculo de la vida útil, de las tres dosificaciones patrón, con los datos aportados por la EHE-08, considerando  $D(t_0)$  para un cemento CEM II/A-V según su relación agua/cemento, el valor de  $D(t)$  (ecuación (7.10)) para  $t$  igual a 50 años, mientras que  $t_0$  se toma a 28 días (0,0767 en años) y para el cálculo del  $K_{CL}$  la  $C_{th}$  en peso de cemento es de 0,6% y la concentración de cloruros en la superficie en peso de cemento,  $C_s$  (tabla 7.5), la que se ha tomado para todos los casos el valor del ambiente IIIa (hasta 500 m), aunque sólo la muestra D1 es la que ha fabricado para un ambiente IIIa.

**Tabla 7.16.-** Aplicación del modelo de cloruros para método general de cálculo para la vida útil, tomando los datos de la EHE-08.

Muestras	$D(t_0)$ $\times 10^{-7}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$D(t=50)$ $\times 10^{-9}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$K_{CL}$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{año}}$ )	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{corr}$ ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L = t_i + t_p$ )
D1P	0,90	3,53	2,56	137,14	45	20	15,00	152,14
D2P	1,49	5,84	3,75	64,00	20	3	44,44	108,45
D3P	1,09	4,27	3,21	87,49	25	2	83,33	170,83

Los valores estimados de vida útil ( $t_L$ ) obtenidos son del mismo orden que los obtenidos mediante el modelo de carbonatación. Se observa que las tres dosificaciones superan ampliamente el valor de cálculo ( $t_d$ ) establecido en 55 años, confirmándose que las dosificaciones tipo son adecuadas para su uso y condiciones de elemento constructivo planteado, repitiéndose la circunstancia que la dosificación D3 (HA-30/F/20/IIb) es la más durable según el modelo, seguida de la D1 (HA-35/P/20/IIIa), aunque hay que aclarar que la  $V_{corr}$  de esta última es siempre mayor debido a la premisa de ser un ambiente IIIa.

En la tabla 7.17 se muestran los datos del cálculo de la vida útil de todas las dosificaciones amasadas, con los datos aportados por la EHE-08 y el valor de  $D(t_0)$  tomado de cada una de las muestras ensayadas, mediante ensayo de penetración de cloruros por inmersión en piscina (tabla 6.9). Y aplicando el  $D(t)$ , donde  $t$  es 50 años,  $t_0$  es 90 días (0,2466 años) y para el cálculo del coeficiente de penetración de cloruros ( $K_{CL}$ ), la concentración crítica ( $C_{th}$ ) en peso de cemento es de 0,4% (la tomada en el ensayo) y la concentración de cloruros en la superficie en peso de cemento ( $C_s$ ) se corresponde con la de cada muestra.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla 7.17.-** Aplicación del modelo de cloruros para método general de cálculo para la vida útil, tomando los datos del ensayo de piscina.

Muestras	$D(t_0)$ $\times 10^{-8}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$D(t=50)$ $\times 10^{-9}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$K_{Cl}$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{año}}$ )	$t_i$ (años)	$d_r$ (mm)	$V_{corr}$ ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	$t_p$ (años)	$t_L$ (años) ( $t_L = t_i + t_p$ )
D1P	0,63	0,45	2,15	194,47	45	20	15,00	209,47
D2P	7,21	5,06	8,78	11,68	20	3	44,44	56,12
D2F	7,49	5,26	8,81	11,59	20	3	44,44	56,04
D2PZT	6,02	4,23	6,87	19,07	20	3	44,44	63,51
D2PV	7,36	5,17	8,66	12,00	20	3	44,44	56,44
D2HS	5,66	3,98	6,29	22,73	20	3	44,44	67,18
D3P	4,10	2,88	6,35	22,32	25	2	83,33	105,66
D3F	9,22	6,47	9,61	9,75	25	2	83,33	93,08
D3PZT	6,36	4,47	7,49	16,06	25	2	83,33	99,39
D3PV	6,54	4,59	8,02	14,00	25	2	83,33	97,33
D3HS	7,79	5,47	8,06	13,84	25	2	83,33	97,18
D3PZC	4,88	3,43	6,86	19,13	25	2	83,33	102,46
D4F	6,24	4,38	8,17	13,49	20	3	44,44	57,94
D4PZT	4,49	3,15	6,82	19,34	20	3	44,44	63,79
D4PV	7,62	5,35	8,89	11,40	20	3	44,44	55,84
D4HS	4,49	3,15	6,88	19,04	20	3	44,44	63,48
D4PZC	5,84	4,10	7,72	15,12	20	3	44,44	59,56

Al analizar los resultados nos encontramos con una diferencia apreciable entre las tres dosificaciones tipo al realizar los cálculos tanto con los datos que sugiere la EHE-08 como con los datos arrojados al introducir en el modelo los valores experimentales de  $D(t_0)$  de cada una de las muestras ensayadas mediante ensayo de piscina. La D1P pasa de una estimación de la vida útil de 152 años a 209, es decir, que en este caso las estimaciones de la EHE-08 son más conservadoras que el valor con los datos de ensayo. En cambio, en las dosificaciones D2 y D3, sucede lo contrario, al introducir en el modelo los datos experimentales del ensayo, los valores de la durabilidad expresados a través de la vida útil ( $t_L$ ) son menores que con valores de la EHE-08.

Respecto al resto de las muestras analizadas, todas superan en menor o mayor grado el valor de cálculo de la vida útil, ( $t_d = 55$  años). Entre las amasadas dosificadas D2, los valores de la vida útil estimada son próximos a los de cálculo. Sólo la D2PZT y la D2HS son mayores un 15% y un 22% respectivamente. Para las amasadas dosificadas D3, el modelo da valores cercanos a los 100 años de vida útil estimada, siendo la D2PZT el valor más alto. Las amasadas dosificadas D4 con los materiales estudiados incorporados como superfinos, el modelo arroja, como es de esperar, valores cercanos a los de la dosificación D2, obteniéndose que la amasada con PZT es la más durable.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## 7.7. Conclusiones.

El modelo de durabilidad para los procesos de corrosión de la EHE-08, se basa en variables difíciles de ensayar y cuantificar experimentalmente en el mundo del día a día de las obras, como la difusión y concentración de cloruros en la superficie, ya que son ensayos de laboratorio de medio y largo plazo. Por ello, en ausencia de estos datos experimentales, nos ofrece tablas genéricas que no recogen toda la casuística que se nos podría plantear en obra.

En el caso del período de iniciación con el modelo de carbonatación, notamos la falta varios de los cementos recogidos por la RC-08 y una mayor división de valores entre los coeficientes del conglomerante. Respecto al período de iniciación con el modelo de penetración de cloruros, el dato clave del coeficiente de difusión de cloruros  $D(t_0)$  aunque abarca las cinco relaciones agua/cemento más usuales, en el concepto de los tipos de cementos vuelve a estar limitada.

En base a estas consideraciones generales y a lo expuesto en los apartados anteriores se puede concluir que:

- Las dosificaciones con adiciones analizadas cumplen con los valores de durabilidad exigidos por la EHE-08 tanto al considerarse los modelos de carbonatación como de penetración de cloruros.

## 7.8. Referencias.

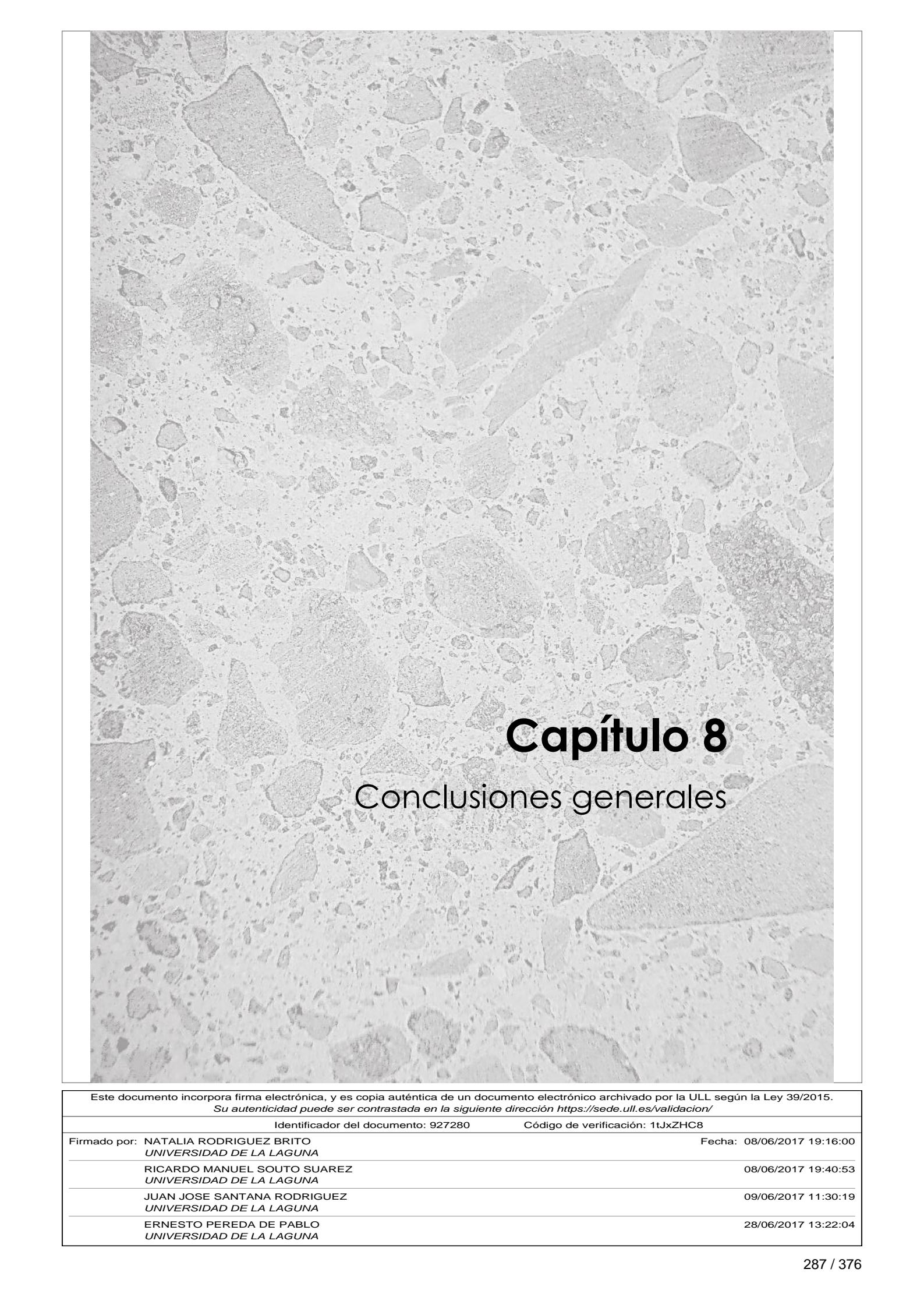
- [1] Ministerio de la Presidencia, REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008. Anejo 9.
- [2] Real Decreto 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08). Ministerio de la Presidencia. BOE nº148, de 19 de junio de 2008, pp. 27794- 27841.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



# Capítulo 8

## Conclusiones generales

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES

### ÍNDICE

8. CONCLUSIONES GENERALES.....	249
--------------------------------	-----

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## CAPÍTULO 8 - CONCLUSIONES GENERALES.

A continuación se detallan las conclusiones generales obtenidas durante el desarrollo de la presente tesis. En ellas se recogen las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos realizados en laboratorio y en exposición natural de los diferentes tipos de hormigones, morteros y pastas de cementos fabricados, con y sin adiciones.

1. Se ha establecido una correlación lineal entre los resultados de porosidad obtenidos tanto por la técnica de intrusión de mercurio como mediante la técnica de accesibilidad por agua, independientemente de la naturaleza de la muestra cuando se aplica un factor de corrección de volumen a la pasta de cemento con respecto a los hormigones. La relación encontrada entre porosidad por intrusión de mercurio y porosidad por accesibilidad del agua para pastas de cemento es de promedio 0,63, mientras que para hormigones dicha relación es de 0,9.
2. A partir de los datos de porosidad por intrusión de mercurio se obtiene que los poros de las muestras de pasta de cemento y de las muestras de hormigón presentan geometría elíptica 1,5:1 hasta un diámetro de 10 nm y geometría circular para diámetros inferiores.
3. La porosidad de las muestras de pasta de cemento es aportada casi en su totalidad por poros de diámetro inferior a 0,1 µm, mientras que la porosidad de las muestras de hormigón está distribuida en poros de mayor diversidad de diámetros. De forma general, un promedio del 40% de la porosidad es aportada por poros de diámetro comprendido entre el valor mayor (sobre 400 µm) hasta 0,1µm.
4. La resistencia a la compresión de las muestras disminuye a medida que aumenta la porosidad, independientemente del método de cuantificación de ésta. La relación entre la evolución de la resistencia a la compresión con la porosidad se puede ajustar a una línea recta, tanto para la porosidad determinada por el método de intrusión de mercurio (MIP) como por accesibilidad al agua. La inclusión de la densidad aparente como variable independiente mejora la predicción de la resistencia a la compresión cuando se realiza una regresión lineal múltiple.
5. La estructura interna de los poros tanto de la pasta de cemento como de los hormigones le confieren propiedades que los hace durables frente a condiciones climatológicas de congelación/descongelación.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

6. Se verifica que la evolución de la resistividad eléctrica tanto para morteros como para hormigones varía con el tiempo siguiendo una ley potencial del tipo  $\rho = a \cdot t^n$ , donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot m$ ),  $t$  el tiempo de exposición (días) y  $a$  y  $n$  constantes. Se observa un rápido aumento de dicho parámetro en los primeros 90 días de curado, estabilizándose posteriormente.
7. Se obtienen menores valores de resistividad eléctrica para los morteros fabricados con cemento CEM II que para los fabricados con cemento CEM IV o puzolánico. La incorporación de las adiciones a los morteros provoca un aumento generalizado de la resistividad eléctrica, produciendo un mayor aumento la adición de humo de sílice (casi un orden de magnitud superior respecto a los no adicionados), seguida de la adición de puzolana y por último la adición de filler o polvillo de áridos para asfaltos. Esto es debido a las reacciones entre los aluminosilicatos de las puzolanas con el hidróxido de calcio, reacciones que provocan una disminución de la porosidad de las muestras.
8. Las muestras curadas en cámara húmeda presentan mayores valores de resistividad respecto a las curadas en balsa, mientras que la dimensión de la probeta no ejerce un efecto determinante en la evolución de la resistividad eléctrica, si bien a mayor diámetro, mayor valor de resistividad.
9. Se ha construido y validado la medida de la resistividad por el método indirecto mediante un equipo de fabricación propia frente a uno comercial, ambos ajustados a norma, obteniéndose unos valores más aproximados a los registrados en la bibliografía con el equipo de fabricación propia.
10. Los valores de resistividad eléctrica medidos tanto por el método indirecto como directo presentan una buena correlación lineal. Se ha introducido el método de medida de la resistividad eléctrica por el método directo de las arandelas o abrazaderas, obteniendo, al igual que en el caso anterior, una muy buena correlación lineal entre esta resistividad y la determinada por el método indirecto.
11. Todos los morteros fabricados con la dosificación tipo y con adiciones cumplen para la máxima resistencia a compresión exigida de morteros de albañilería  $M_d (>25 \text{ N/mm}^2)$ , si bien las adiciones provocan una disminución de este parámetro. Los morteros fabricados con CEM II/A-P/42,5R presentan mayores valores de resistencia que los fabricados con CEM IV/B-P/32,5N.
12. En los morteros, las adiciones, así como el árido canario frente a la arena ensacada, provocan un aumento en la porosidad de las muestras con respecto a la dosificación patrón, excepto cuando se adiciona puzolana de

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

toba (PZT). Las probetas adicionadas con filler son las que presentan los mayores aumentos de porosidad, con incrementos de hasta un 20%.

13. Las adiciones provocan en los morteros un aumento en la resistividad de las probetas con respecto a la dosificación patrón. En orden decreciente, la adición que provoca un mayor aumento es el humo de sílice, seguido de la puzolana de toba y, por último, el filler. Las probetas fabricadas con cemento tipo CEM IV dan mayores valores de resistividad en comparación con las elaboradas con CEM II.
14. La penetración de agresivos se ve afectada por la incorporación de adiciones. Las adiciones provocan una disminución en la velocidad y profundidad de penetración de cloruros cuando se combinan con arena ensacada mayor que con arena normalizada. Las dosificaciones elaboradas con cemento tipo CEM II presentan niveles de velocidad y penetración de cloruros superiores a las elaboradas con CEM IV. La puzolana de toba mejora las dosificaciones respecto a la dosificación patrón disminuyendo la velocidad y penetración de cloruros.
15. La velocidad de avance del frente de carbonatación se reduce con el tiempo de exposición. La carbonatación en las muestras patrón formuladas con cemento CEM II ha resultado ser inferiores a las muestras con CEM IV. A su vez, los morteros formulados con árido ensacado canario presentan un mayor frente de carbonatación que las muestras con árido normalizado. Todas las adiciones provocan un aumento en la velocidad de carbonatación de las muestras por lo que han empeorado su comportamiento.
16. Todas las amasadas de hormigón de laboratorio, confeccionadas con los materiales estudiados, ya sean incorporados al hormigón como adiciones o como árido superfino, superan la resistencia característica mínima exigida para cada caso. La adición del humo de sílice genera en todos los casos un aumento en la resistencia a compresión respecto a la dosificación patrón. El resto de las adiciones presentan una disminución en la resistencia a compresión cuando su porcentaje es restado al del cemento. Si los materiales son incorporados como árido superfino, se observa un aumento en la resistencia a compresión, siendo dicho efecto mayor con la puzolana de toba, seguido en orden decreciente por el humo de sílice, la puzolana de cantera, el polvo de pulir y el filler.
17. Todas las dosificaciones con adiciones superan el índice de actividad resistente al agua de mar (IAR), cumpliendo con una de las tres especificaciones de la norma UNE 80303-2:2001.
18. Todos los hormigones dosificados presentan consistencia entre plástica y líquida. Las amasadas adicionadas cambian su consistencia respecto a la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		28/06/2017 13:22:04

patrón, de deduciéndose que la introducción de los materiales estudiados influyen en la consistencia. Se observan las pérdidas de docilidad más acusadas en el comportamiento de las amasadas dosificadas con humo de sílice.

19. Las amasadas de hormigón con alta relación agua/cemento, con la adición de puzolana de toba y humo de sílice, reducen la porosidad con respecto a la dosificación patrón. En cambio, en otra dosificación con una relación agua/cemento menor, en las amasadas con adiciones, las porosidades han aumentado. En cuanto, las porosidades de las amasadas con los materiales introducidos como superfino se han visto reducidas las porosidades en todos los casos.
20. Las dosificaciones donde se ha sustituido el cemento por la adición muestran un aumento en la penetración de agua con respecto a la dosificación patrón. Sin embargo, al ser sustituidos como árido superfino, la penetración de agua se ve disminuida, sobre todo con las adiciones de puzolana de toba y de humo de sílice.
21. Las dosificaciones adicionadas con filler, polvo de pulir y puzolana de cantera provocan un descenso en el valor de resistividad con respecto a la dosificación patrón mientras que aumenta con puzolana de toba en las dosificaciones de alta relación agua/cemento y con humo de sílice en las tres dosificaciones en las que se emplea.
22. El proceso de carbonatación, tanto natural como acelerada, se ve favorecido por la incorporación de adiciones en detrimento de cemento, a excepción de la puzolana, la cual retrasa el proceso de carbonatación natural respecto a la dosificación patrón en todos los casos estudiados. Cuando las adiciones se incorporan como superfino las velocidades de carbonatación son aproximadamente igual a la amasada patrón e incluso menor.
23. Se observa una relación lineal entre los procesos de carbonatación natural y acelerada, lo que indica que la correlación entre ambas técnicas es independiente de la naturaleza de la muestra. El método de carbonatación acelerada arroja valores de velocidad de carbonatación 7,5 veces superiores a los obtenidos por exposición natural.
24. En el ensayo de penetración de cloruros por inmersión en piscina, las amasadas en las que se ha incorporado el filler, el polvo de pulir y puzolana de cantera presentan un aumento en la penetración de cloruros respecto a la dosificación patrón, mismo comportamiento observado para todas las dosificaciones. En las amasadas con puzolana de toba y humo de sílice la velocidad de penetración de cloruros se ha visto reducida o igualada con respecto a la dosificación patrón.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

25. El perfil de penetración de cloruros en las probetas se ajusta a una recta decreciente. Los coeficientes de difusión no estacionaria de cloruros se encuentran en el rango de entre  $4$  y  $9,2 \cdot 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s. Al determinar la penetración de cloruros por el método multirregimen se observa la misma tendencia que en el ensayo por inmersión en piscina. El método integral acelerado arroja valores de coeficientes de difusión del mismo orden de magnitud que los obtenidos con el método multirregimen, con la información adicional del tiempo de despasivación de la armadura.
26. Se observa una clara relación lineal entre los resultados de resistencia a compresión y la porosidad accesible con la velocidad de penetración de cloruros y velocidad de avance de la carbonatación obtenida tanto por exposición natural como acelerada.
27. De forma general, la puzolana de toba y el humo de sílice mejoran algunas de las propiedades de las dosificaciones. El resto de los materiales pueden ser incorporadas como superfinos ya que las dosificaciones resultantes cumplen con el requisito mínimo de resistencia mecánica.
28. Todas las muestras adicionadas cumplen con el criterio de durabilidad según el anexo 9 de la EHE-08.

---

253

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Capítulo 8

---

---

254

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

# Anexo I

## Simbología utilizada

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **ANEXO I**

### **SIMBOLOGÍA UTILIZADA**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## ANEXO I – SIMBOLOGÍA UTILIZADA.

En este anexo se nombran la simbología de unidades utilizada en el texto de la presente tesis.

A	pendiente de la recta de la regresión lineal del periodo del estado estacionario, (mol/s).
$A_c$	área transversal de la probeta sobre la que se aplica la fuerza de compresión en probetas de hormigón, ( $\text{mm}^2$ ).
$A_v$	volumen de agua, ( $\text{dm}^3$ ).
$a'$ y $b'$	coeficientes del tipo de conglomerante.
$a$	distancia entre las puntas de los electrodos del resistivímetro, (m).
$b$	lado de la sección cuadrada de la probeta de mortero, (mm).
$b_r$	radio efectivo de un átomo de mercurio.
$C_b$	contenido de cloruros aportado por las materias primas, (%).
$C_{Cl}$	contenido en cloruros de la muestra, (%).
$C_s$	concentración de cloruros en la superficie del hormigón, (%).
$C_{th}$	concentración crítica de cloruros, (%).
$C_l$	concentración inicial de cloruro en el catolito, ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ ).
$C_l^-$	cantidad de cloruros en el anolito, (mol).
$C_{air}$	coeficiente de aireantes.
$C_{env}$	coeficiente de ambiente.
$C_T$	conductividad eléctrica obtenida a la temperatura de ensayo, ( $\text{mS}/\text{cm}$ ).
$C_{25}$	conductividad eléctrica obtenida a los 25 °C, ( $\text{mS}/\text{cm}$ ).
D	diámetro de la probeta de libre paso, (mm).
$D_a$	tamaño máximo del árido, (mm).
$D_{ns}$	coeficiente de difusión en condiciones de ensayo natural, en estado no estacionario, ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Anexo I

$D_{ns\ medio}$	coeficiente de difusión medio en condiciones de ensayo natural, en estado no estacionario, (cm <sup>2</sup> /s).
$D_s$	coeficiente de difusión en estado estacionario, (cm <sup>2</sup> /s).
$D(t)$	coeficiente de difusión a la edad $t$ , (cm <sup>2</sup> /s).
$D(t_0)$	coeficiente de difusión a la edad $t_0$ , (cm <sup>2</sup> /s).
$d$	diámetro equivalente de poro, ( $\mu\text{m}$ ).
$d_a$	apertura de cada uno de los tamices de la serie empleada, (mm).
$d_m$	tamaño medio del poro, ( $\mu\text{m}$ ).
$d_p$	profundidad de penetración del agresivos, (mm).
$d_r$	espesor de recubrimiento del hormigón sobre el acero, (mm).
$e$	espesor de la probeta, (cm).
$EDF$	factor de durabilidad del árido.
$E_{corr}$	potencial de la armadura frente a un electrodo de referencia,(V)
$F$	constante de Faraday, (23060 cal/V <sub>eq</sub> ).
$F_c$	carga máxima en rotura aplicada, (N).
$F_f$	factor de forma.
$F_g$	factor geométrico, depende del tamaño de la probeta, (m).
$f$	molaridad de la disolución de nitrato de plata.
$f_{ck}$	resistencia característica especificada, (N/mm <sup>2</sup> ).
$f_{cm}$	resistencia media del hormigón a compresión, (N/mm <sup>2</sup> ).
$I$	intensidad eléctrica que circula por el circuito, (A).
$I_{corr}$	corriente de corrosión, (A).
$I_{corr,media}$	media de las velocidades de corrosión medidas durante el periodo de propagación de la corrosión en condiciones naturales, mediante la medida de la $R_p$ , (A).

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

$I_{corr,completa}$	velocidad de corrosión estabilizada durante el periodo de propagación en condiciones aceleradas, mediante la medida de la $R_p$ , (A).
$I_{despasivación}$	corriente que circula por la probeta justo antes de la finalización del ensayo, (A).
$I_{inicial}$	corriente que circula por la probeta, (A).
$K$	coeficiente que depende del tipo de agresivo, material y de las condiciones ambientales.
$K_c$	coeficiente de penetración de la carbonatación.
$K_{Cl}$	coeficiente de penetración de los cloruros.
$k$	constante de celda, (m).
$L_e$	altura de la probeta para la constante de celda, (m).
$L$	distancia entre electrodos (espesor de la probeta), (cm).
$l$	distancia entre los soportes, ensayo de resistencia a flexión de morteros, (mm).
$l_p$	longitud en el cálculo de la resistividad (m).
$m$	masa, (kg).
$m_{ci}$	masa de la muestra de hormigón, (g).
$m_f$	diferencia de masa entre el molde vacío y lleno en estado fresco, (kg).
$m_h$	masa de la probeta saturada en cámara húmeda 28 días, (kg).
$m_r$	masa de la probeta en la recepción, tras sacar del molde a las 24 horas, (kg).
$m_s$	masa de la probeta seca a 100 °C, (kg).
$m_i$	masa de probeta seca a 70 °C, (g).
$m_3$	masa saturada a vacío, (g)
$m_4$	masa aparente hidrostática, (g).
$n$	factor de edad.
$P$	presión a la que el mercurio es introducido en el poro, (MPa).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Anexo I

$P_{corr}$	penetración homogénea equivalente de la corrosión o perdida de radio de la barra, (cm).
$P_{max}$	profundidad máxima, (mm).
$P_{med}$	profundidad media, (mm).
$P_0$	porosidad accesible al agua, (%).
$R_\Omega$	resistencia eléctrica, ( $\Omega$ ).
$R$	constante de los gases perfectos, (1,9872 cal/(mol·K)).
$R_c$	resistencia a compresión de morteros y hormigones, (MPa o N/mm <sup>2</sup> ).
$R_e$	resistencia eléctrica del hormigón, ( $\Omega$ ).
$R_{e\ despasiva}$	resistencia eléctrica en el momento de despasivación del hormigón, ( $\Omega$ ).
$R_{e\ inicial}$	resistencia eléctrica inicial del hormigón, ( $\Omega$ ).
$R_{e+sp}$	resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas, ( $\Omega$ ).
$R_f$	resistencia a flexión de morteros (MPa o N/mm <sup>2</sup> )
$R_p$	resistencia de polarización de la barra, ( $\Omega$ ).
$R_r$	radio de curvatura del menisco.
$R_{sp}$	resistencia eléctrica de las esponjas o paños, ( $\Omega$ ).
$S$	área superficial de la probeta expuesta a la disolución de cloruros, (cm <sup>2</sup> )
$S_c$	es superficie de los platos de carga ensayo resistencia a compresión de mortero, (mm <sup>2</sup> ).
$S_e$	área de la cara de la probeta de contacto con las esponjas y electrodos, (m <sup>2</sup> ).
$s$	sección transversal de la resistencia eléctrica, (m <sup>2</sup> ).
$ssi$	punto de inicio de la recta de regresión lineal.
$ssf$	punto de fin de la recta de regresión lineal.
$T$	temperatura, (°C).

260

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

$t$	periodo de tiempo, (años).
$t_c$	periodo de tiempo de exposición de ensayo,(años).
$t_d$	valor de cálculo de la vida útil, (años).
$t_g$	valor de la vida útil de proyecto, (años).
$t_i$	período de iniciación de la corrosión, (años).
$t_p$	período de propagación de la corrosión, (años).
$t_{lag}$	tiempo hasta corrosión del acero en el ensayo acelerado, (s).
$t_L$	valor estimado de la vida útil, (años).
$t_{paso}$	tiempo de paso, obtenido de la intersección de la recta de ajuste del tramo de estado estacionario con el eje X, en regresión lineal, (s).
$t_0$	edad de ensayo, (0,0767 años).
$V$	diferencia de potencial entre los dos electrodos centrales, al aplicar la corriente, (V).
$V_a$	volumen de agua destilada en el anolito, (L).
$V_{árido}$	volumen total de áridos, ( $\text{dm}^3$ )
$V_c$	volumen de la disolución de cloruro sódico en el catolito, (L).
$V_{\text{CO}_2}$	velocidad de carbonatación, ( $\text{mm}/\sqrt{\text{año}}$ ).
$V_{\text{CO}_2, 3\%}$	velocidad de carbonatación acelerada al 3%, ( $\text{mm}/\sqrt{\text{año}}$ ).
$V_{\text{Cl perfil}}$	velocidad de avance del agresivo, ( $\text{mm}/\sqrt{\text{año}}$ ).
$V_{\text{corr}}$	velocidad de corrosión del acero de las armaduras, ( $\mu\text{m}/\text{año}$ ).
$V_{\text{cto}}$	el volumen de cemento, ( $\text{dm}^3$ ).
$V_i$	diferencia de potencial sin conexión de la corriente, (V).
$V_h$	Volumen cuando se usan aireantes, ( $\text{dm}^3$ ).
$V_G$	volumen geométrico, ( $\text{m}^3$ ).
$V_l$	volumen de la disolución de tiocianato de amonio consumido en la valoración, (mL).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Anexo I

$V_2$	volumen de la disolución de tiocianato de amonio consumido en la valoración del blanco, (mL).
$V_{4,5}$	volumen total de intrusión de mercurio, (cm <sup>3</sup> /g).
$\Delta V$	potencial aplicado, (V).
$v$	volumen, (m <sup>3</sup> ).
$X_{CO_2}$	profundidad media de carbonatación, (mm).
$X_{CO_2,3\%}$	profundidad media de carbonatación acelerada al 3%, (mm).
$X_{Cl \text{ perfil}}$	profundidad del perfil de cloruros, (mm).
$\gamma$	coeficiente de actividad del ion cloruro de la disolución de catolito (0,657)
$\gamma$	porcentaje acumulado que pasa por los tamices de abertura "d".
$z$	valencia del ion cloruro (1).
$\alpha$	factor de conversión de unidades (56457).
$\gamma$	tensión superficial del mercurio, (N/m).
$\gamma_t$	coeficiente de seguridad de la vida útil (1,10).
$\gamma_s$	tensión superficial del mercurio plana, (N/m).
$\delta$	densidad, (kg/m <sup>3</sup> ).
$\delta_a$	densidad aparente de las partículas, (g/cm <sup>3</sup> ).
$\delta_f$	densidad en estado fresco del hormigón, (kg/m <sup>3</sup> ).
$\delta_h$	densidad tras 28 días de curado en cámara húmeda, (kg/m <sup>3</sup> ).
$\delta_r$	densidad en las condiciones de recepción del hormigón, (kg/m <sup>3</sup> ).
$\delta_{rd}$	densidad de las partículas tras secado en estufa, (g/cm <sup>3</sup> ).
$\delta_{rds}$	densidad de las partículas saturadas con la superficie seca, (g/cm <sup>3</sup> ).
$\delta_s$	densidad seca, (kg/m <sup>3</sup> ).
$\theta$	ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes del poro, (°).

262

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

$\lambda$	factor de equivalencia de recubrimiento del mortero.
$\rho$	resistividad, ( $\Omega \cdot m$ ).
$\rho_e$	resistividad eléctrica, ( $\Omega \cdot m$ ).
$\rho_w$	resistividad eléctrica del hormigón mediante el método de Wenner, ( $\Omega \cdot m$ ).
$\rho_{probeta}$	resistividad eléctrica de las probetas de hormigón, ( $\Omega \cdot m$ ).
$\phi$	diámetro de la armadura, (mm)
$\Delta\phi$	campo eléctrico normalizado, (V/cm) ( $\Delta\phi = \Delta V/L$ ).
$\Delta\Phi_{ss}$	media de los voltajes efectivos medidos durante el periodo de estado estacionario, (V).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

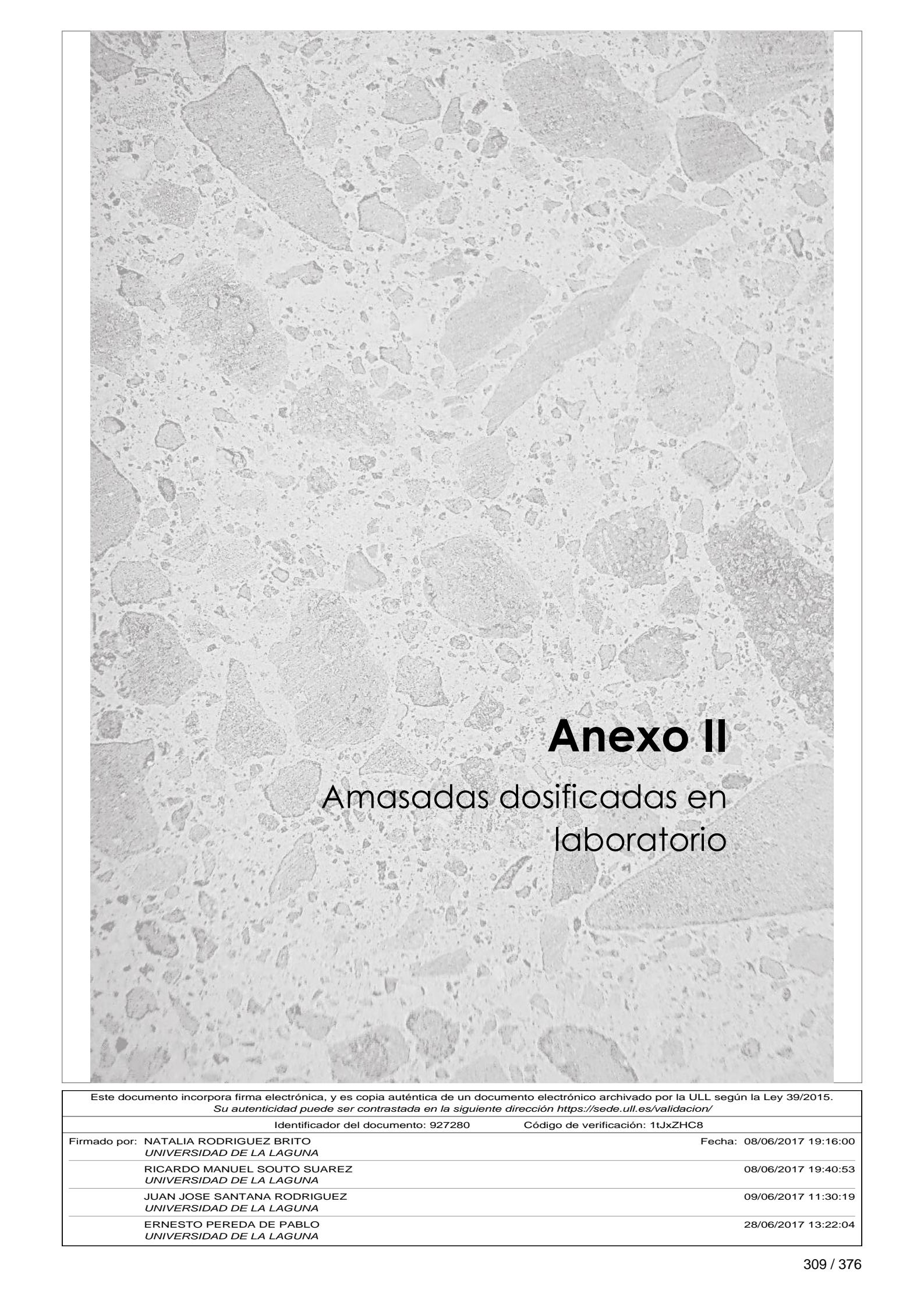
Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



## Anexo II

### Amasadas dosificadas en laboratorio

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO <i>UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</i>	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **ANEXO II**

### **AMASADAS DOSIFICADAS EN LABORATORIO**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## ANEXO II – AMASADAS DOSIFICADAS EN LABORATORIO

En base a los resultados arrojados por los morteros, en los que se vislumbra que sus propiedades varían según las adiciones que se les hayan introducidos se decidió amasar varios hormigones patrón de dosificaciones tipo que, en mayor o menor medida, cumplen las exigencias de la EHE-08 [1], con el objeto de verificar como les afectan las adiciones seleccionadas.

Dosificar un hormigón es llegar a obtener la combinación más apropiada, funcional y económicamente, de sus componentes: áridos, cemento, agua, aditivos y/o adiciones, con el fin de lograr una mezcla con las características adecuadas al uso de proyecto del hormigón, como son su consistencia, resistencia, durabilidad, etc.

No existe un método único de dosificación del hormigón, sino que se debe elegir el más adecuado según sus componentes y requisitos a cumplir. En este trabajo se ha elegido el Método de Fuller [2].

El método de dosificación de Fuller es uno de los más clásicos, que tiene como dato de partida la dosificación fija de la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón. Otros datos a tener en cuenta son la consistencia del hormigón, granulometrías de los distintos áridos (arena y grava), densidades relativas de los áridos (arena y grava), densidad de conjunto y pesos.

El método considera como tamaño máximo del árido al que corresponde al tamiz más pequeño de la serie utilizada que retenga menos del 15% del peso total del árido. Para evitar tanteos, ya que la composición del árido conjunto no se conoce hasta el final, se considera para la grava, como tamaño máximo, la abertura del menor tamiz que retiene al menos 25% al ser cribada.

La cantidad de agua se elige según el tipo de árido, tamaño máximo, y la consistencia que debe tener según sea su método de puesta en obra. Partiendo de la idea de que el hormigón es colocado mediante bombeo, la más adecuada es blanda, es decir, un cono de Abrams entre 6 y 9 cm. Estas premisas se deben empastar con las recomendaciones y prescripciones de la EHE-08.

Partiendo de una dosificación tipo, sancionada por la práctica, aportada por una central de hormigón, hemos tanteado y comprobado los porcentajes más adecuados con los tipos de áridos que disponemos. Para ello comprobamos el módulo granulométrico de los áridos y su adaptación a la curva de Fuller.

Mediante el ensayo de granulometría de los áridos se pretende establecer la proporción de los mismos en la búsqueda de un hormigón compacto y trabajable. La granulometría se define en función de los volúmenes reales comprendidos entre dos tamaños consecutivos de tamices de apertura de malla normalizada. La UNE 7050 define la siguiente serie, de modo que las diferencias de tamaño son constantes en

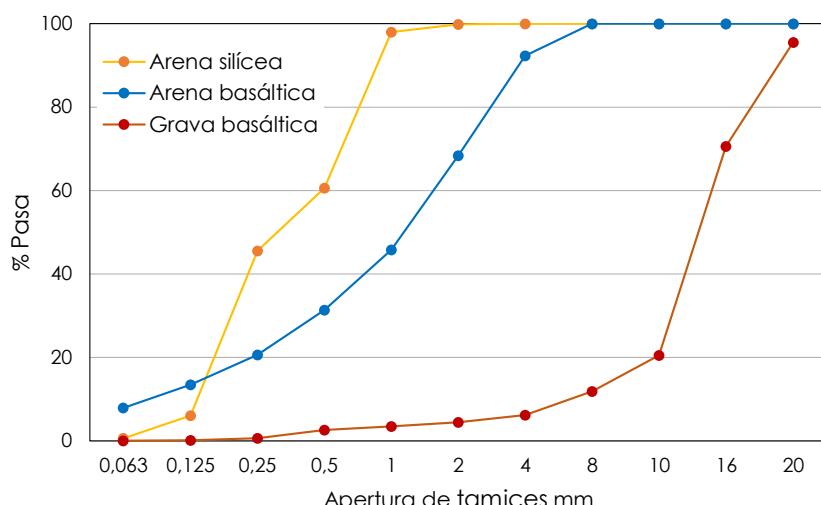
Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

escala logarítmica: 80; 40; 20; 10; 5; 2,5; 1,2; 0,6; 0,32; 0,16; 0,08 mm. Las curvas granulométricas expresan en abscisa las aperturas, y en ordenadas los porcentajes acumulados que pasan por ese tamiz de la serie.

Los áridos para este estudio han sido proporcionados por la empresa SATOCAN y acopiados y ensayados en las instalaciones del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción. En la tabla All.1 se muestran sus propiedades incluyendo el origen, tamaño y coeficiente de absorción. En la figura All.1 se muestran las curvas granulométricas realizadas a los áridos mediante la UNE-EN 933-1:2012 [3].

**Tabla All.1.-** Origen, tamaño y coeficiente de absorción de los áridos.

Árido	Origen	Tamaño	Coeficiente de absorción
Arena	Silícea	0/2	1,50
Arena	Basáltica	0/4	3,95
Grava	Basáltica	10/20	3,65



**Figura All.1.-** Curvas granulométricas de los áridos empleados: • arena silícea;  
• arena basáltica; • grava basáltica.

Según Fuller, para conseguir una buena compacidad y docilidad se deberían ajustar lo máximo posible las curvas resultantes de los tres áridos a la curva granulometría del porcentaje acumulado que pasa por los tamices de una curva denominada Parábola de Gessner, mediante la ecuación (All.1):

$$y = 100\sqrt{d_a / D_a} \quad (\text{All.1})$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>		
Identificador del documento:	927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por:	NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
	RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
	JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
	ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

donde:

- $y$  es el porcentaje acumulado que pasa por los tamices de abertura  $d_a$  (%).
- $D_a$  es el tamaño máximo del árido (mm).
- $d_a$  es la apertura de cada uno de los tamices de la serie empleada (mm).

En la granulometría de referencia, la abertura del tamiz  $d$  viene determinado por el tamaño máximo del árido  $D_a$ . Para los áridos utilizados en las amasadas de ensayo fabricadas en el laboratorio, los valores de  $y$  están función de la relación de  $d/D$ , por lo que a partir de la ecuación anterior deducimos la siguiente tabla (All.2):

**Tabla All.2.-** Granulometría de referencia.

$d/D$	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128	1/256	1/512	1/1024
$y$	100	70,7	50	35,4	25	17,5	12,5	8,6	6	4,2	3

Para trabajar con este concepto hay que definir el módulo granulométrico de una fracción de árido y de la mezcla. Es normal realizar varios tanteos de las proporciones de los acumulados hasta ajustarse lo máximo posible a la de referencia. Aunque en realidad no es preciso un ajuste perfecto, basta con que las áreas estén compensadas por encima y por debajo de ella.

En el método de cálculo del módulo granulométrico de la mezcla total y de las mezclas parciales, el sistema considera que el árido está dividido en  $n$  tamaños, definiendo los módulos granulométricos de los áridos por  $m_n$ , por  $m_{tn}$  los módulos granulométricos de las curvas de Fuller y llamando  $t_n$  a los tantos por cientos que hay que mezclar para que la curva resultante se ajuste a la de referencia, como muestra de forma genérica la siguiente tabla (All.3).

**Tabla All.3.-** Indicaciones de: tamaño máximo, módulo granulométrico, módulo granulométrico de Fuller (ideal) y proporciones de las mezclas.

Árido	Tamaño máximo (mm)	Módulo granulométrico (real)	Módulo granulométrico de Fuller (ideal)	Proporciones de las mezclas
Arena 1	$D_1$	$m_1$	$m_{t1}$	$t_1$
Grava 2	$D_2$	$m_2$	$m_{t2}$	$t_2$
Grava 3	$D_3$	$m_3$	$m_{t3}$	$t_3$
Grava 4	$D_4$	$m_4$	$m_{t4}$	$t_4$
...	...	...	...	...
Grava n	$D_n$	$m_n$	$m_{tn}$	$t_n$

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Mediante los siguientes sistemas de ecuaciones (All.2), se calculan las proporciones de las muestras de la mezcla, que se designan por  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , necesarias para ajustarse a los valores ideales.

$$\begin{aligned} t_1 + t_2 + \dots + t_n &= 100 \\ m_{t_2} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2}{t_1 + t_2} \\ m_{t_3} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2 + t_3 m_3}{t_1 + t_2 + t_3} \\ m_{t_n} &= \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2 + t_3 m_3 + \dots + t_n m_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} \end{aligned} \quad (\text{All.2})$$

En el caso de usar dos fracciones de áridos, la resolución del sistema de ecuaciones anterior es (All.3):

$$\begin{aligned} t_1 &= 100 + \frac{m_2 - m_{t_2}}{m_2 - m_1} \\ t_2 &= 100 - t_1 \end{aligned} \quad (\text{All.3})$$

En el caso de usar tres fracciones de áridos, la resolución del sistema de ecuaciones es (All.4):

$$\begin{aligned} t_1 &= (t_1 + t_2) + \frac{m_2 - m_{t_2}}{m_2 - m_1} \\ t_1 &= (t_1 + t_2) - t_1 \\ t_3 &= 100 - (t_1 + t_2) \end{aligned} \quad (\text{All.4})$$

siendo:

$$t_1 + t_2 = 100 \cdot \frac{m_3 - m_{t_3}}{m_3 - m_{t_2}} \quad (\text{All.5})$$

Para evaluar el volumen real de los áridos que son necesarios para incorporar en el hormigón, hay que aplicar ciertas correcciones. Así, para obtener la dosificación por metro cúbico, una vez hallada la proporción en la que hay que mezclar las distintas fracciones de los áridos, hay que tener en cuenta que el volumen de la pasta de cemento es menor que la suma de los volúmenes iniciales del cemento y del agua que la forman. Para fabricar un volumen de 1000 L (dm<sup>3</sup>) de hormigón endurecido necesitaremos 1025 L (dm<sup>3</sup>) de hormigón fresco, es decir, de sus componentes (All.6).

$$1025 = A_v + V_{cto} + V_{árido} + V_h \quad (\text{All.6})$$

siendo:

- $A_v$  el volumen de agua (dm<sup>3</sup>).
- $V_{cto}$  el volumen de cemento, (peso de cantidad de cemento/densidad de cemento) (dm<sup>3</sup>).
- $V_h$  cuando se usan aireantes (dm<sup>3</sup>).
- $V_{árido}$  el volumen total de áridos (peso áridos/densidad áridos) (dm<sup>3</sup>)

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

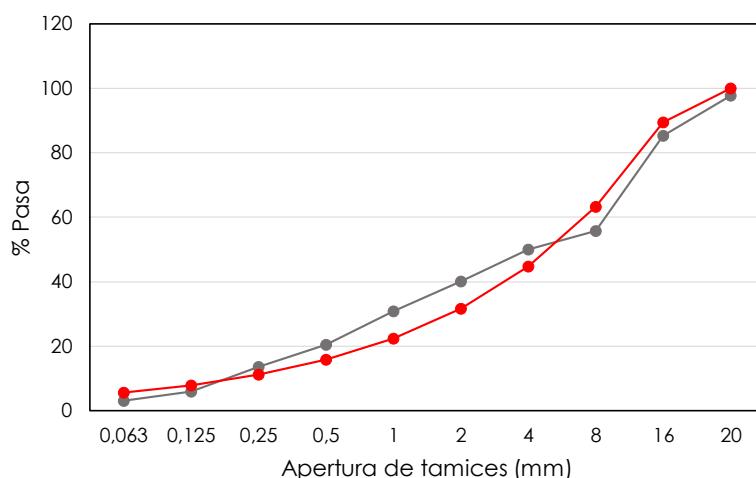
Será más exacto establecer las proporciones de los áridos en volúmenes reales y deducir el peso específico de cada fracción.

Para la dosificación de las amasadas objeto de estudio, no partimos de cero, sino de la base de unas proporciones, sancionadas por la práctica, facilitadas por una planta de hormigón (tabla All.9).

**Tabla All.4.-** Proporción de la dosificación de planta.

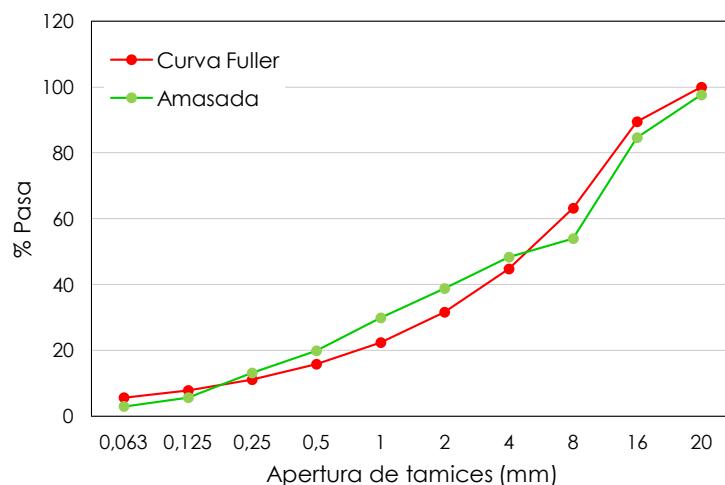
Dosificación	kg/m <sup>3</sup>
Tipo de cemento	II/A-P/42,5R M
Cantidad cemento	350
Grava basáltica	910,86
Arena basáltica	624,12
Arena África	209,52
Cantidad agua	168
Relación agua/cemento (%)	0,51
Plastificante	Melcret 0,9%
Superplastificante	Daracem 1,25%

En la figura All.2 se representa el resultado de la curva granulométrica de la mezcla de los tres áridos en las proporciones empleados para la dosificación base (color gris), mostrada en la tabla All.4, y la curva granulométrica de referencia de Fuller (color rojo).



**Figura All.2.-** Curvas granulométricas de los áridos adaptadas a Fuller. • Curva de Fuller; ● Curva granulométrica de la mezcla de áridos.

Como se puede apreciar en la figura AII.2, la curva de la mezcla de los tres áridos no se ajusta a la curva de referencia de Fuller. Para mejorar la distribución granulométrica, se ha disminuido el porcentaje de grava y aumentado el de arena, de manera que se han compensado las áreas creadas por encima y debajo de la curva de referencia de Fuller, obteniendo la distribución mostrada en la figura AIII.3.



**Figura AIII.3.-** Curvas granulométricas de los áridos adaptadas a Fuller • Curva de Fuller; • Curva granulométrica de la mezcla de áridos modificada.

En el presente estudio se plantearon cuatro tipos de dosificaciones de hormigones. Se fabricaron patrones sin adición, a los que después se le añadieron cuatro o cinco tipos de adiciones según el caso, con el objeto de analizar y cuantificar las modificaciones que se producen respecto al hormigón patrón y así analizar el efecto que ejerce cada tipo de adición en la dosificación de partida.

Se fabricó una primera dosificación (tabla AII.5) de amasada patrón de hormigón, denominada D1P, que puede ser clasificada e identificada según la EHE como HA-35/P/20/IIa. Esta dosificación se consideró como un hormigón de referencia respecto a la durabilidad ya que esta formulada como un hormigón que cumple ampliamente con los parámetros de durabilidad establecidos por la EHE-08.

Esta dosificación patrón no ha sido modificada con la introducción de las adiciones propuestas en el estudio. Los resultados de ensayo de este hormigón los tomamos como resultados de ensayos de un hormigón de referencia de alta durabilidad, para comparar después los resultados que obtengamos con las dosificaciones a las que añadiremos las adiciones.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla AII.5.-** Proporción de la dosificación patrón (D1P).

Codificación	D1P
Fecha fabricación	23/09/2015
Nº de probetas	14
Tipo de cemento	II/A-P/42,5R MR
Resistencia cemento (N/mm <sup>2</sup> )	52,5
Cantidad cemento (kg/m <sup>3</sup> )	325
Tipo de adición	Sin Adición
Grava basáltica (kg/m <sup>3</sup> )	806,19
Arena basáltica (kg/m <sup>3</sup> )	688,08
Arena sílica (kg/m <sup>3</sup> )	250,23
Cantidad agua (L)	156
Relación agua/cemento (%)	0,51
Plastificante	TIMM 0,9%
Superplastificante	Techmo 1,25%

Una segunda dosificación patrón de un hormigón (D2P) se incluye en la tabla AII.6, que podemos identificar según la EHE como HA-25/F/20/Ila. Esta dosificación sí que ha sido adicionada con cuatro materiales distintos: filler (D2F), puzolana de toba (D2PZT), polvo de pulir (D2PV) y humo de sílice (D2HS). En las cuatro amasadas adicionadas la cantidad de material es restado de la cantidad de cemento.

**Tabla AII.6.-** Proporción de dosificación patrón (D2P) y sus amasadas con adiciones.

Codificación	D2P	D2F	D2PZT	D2PV	D2HS
Fecha fabricación	16/03/16	07/04/16	14/04/16	14/04/16	21/06/16
Nº de probetas	14	14	14	14	10
Tipo de cemento			II/A-P/42,5R MR		
Rest. cto. (N/mm <sup>2</sup> )	52,5	52,5	52,5	52,5	54,7
Cant. cto. (kg/m <sup>3</sup> )	300	240	240	240	240
Tipo adición	Patrón	Filler	Puz Toba	Polvo pulir	Humo sílice
Cant. adición (kg/m <sup>3</sup> )	---	60	60	60	60
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	502	502	502	502	502
Arena África	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75
Cant. agua (L)	150	150	150	150	150
Relac. agua/cemento (%)	0,76	0,73	0,73	0,73	0,73
Plastificante	TIMM 0,9%	TIMM 0,9%	TIMM 0,9%	TIMM 0,9%	TIMM 0,9%

Una tercera dosificación patrón de hormigón (D3P) se muestra en la tabla AII.7, que podemos identificar según la EHE como HA-30/F/20/Iib. Ésta ha sido adicionada con cinco materiales distintos: filler (D3F), puzolana de toba (D3PZT), puzolana de cantera (D3PZC), polvo de pulir (D3PV) y humo de sílice (D3HS). En las amasadas adicionadas la cantidad de material es introducido como adición, por lo que es restado de la cantidad de cemento.

Identificador del documento: 927280	Código de verificación: 1tJxZHC8
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

**Tabla AII.7.-** Proporción de dosificación patrón (D3P) y sus amasadas con adiciones.

Codificación	D3P	D3F	D3PZT	D3PV	D3PZC	D3PV
Fecha fabricación	14/04/16	25/05/16	25/05/16	31/05/16	31/05/16	21/06/16
Nº de probetas	14	10	10	10	10	10
Tipo de cemento			II/A-P/42,5R MR			
Rest. Cto. (N/mm <sup>2</sup> )	52,5	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7
Cant. Cto. (kg/m <sup>3</sup> )	300	240	240	240	240	240
Tipo adición	Patrón	Filler	Puz Toba	Filler	Puz Cantera	Humo sílice
Cant. adición (kg/m <sup>3</sup> )	---	60	60	60	60	60
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	502	502	502	502	502	502
Arena África	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75
Cant. agua (L)	150	150	150	150	150	150
Relación agua/cemento (%)	0,56	0,58	0,57	0,58	0,57	0,56
Plastificante	TIMM 1,125%			TECHNOCEM930 2%		
Superplastificante				Powerflow 1,2%		

En la cuarta tanda de amasadas (tabla AII.8), la amasada patrón es la misma que en la dosificación 2 (D4P=D2P=HA-25/B/20/Ila), a la que se ha pretendido mejorar con la incorporación a las mismas de los materiales como un árido superfino, restando su peso de la arena basáltica y no del cemento como en los casos anteriores. Los cinco materiales incorporados son: filler (D4F), puzolana de toba (D4PZT), puzolana de cantera (D4PZC), polvo de pulir (D4PV) y humo de sílice (D4HS).

**Tabla AII.8.-** Proporción de dosificación patrón (D4P) y sus amasadas con adiciones.

Codificación	D4P=D2P	D4F	D4PZT	D4PV	D4PZC	D4PV
Fecha fabricación	14/04/16	25/05/16	25/05/16	31/05/16	31/05/16	21/06/16
Nº de probetas	14	10	10	10	10	10
Tipo de cemento			II/A-P/42,5R MR			
Rest. cto. (N/mm <sup>2</sup> )	52,5	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7
Cant. cto. (kg/m <sup>3</sup> )	300	300	300	300	300	300
Tipo adición	Patrón	Filler	Puz Toba	Filler	Puz Cant. Humo sílice	
Cant. adición (kg/m <sup>3</sup> )	---	60	60	60	60	60
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75	945,75
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	502,00	502,00	502,00	502,00	502,00	502,00
Arena África	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75	296,75
Cant. agua (L)	150	150	150	150	150	150
Relación agua/cemento (%)	0,56	0,58	0,57	0,58	0,57	0,56
Plastificante	TIMM 1,125%			TECHNOCEM930 2%		
Superplastificante				Powerflow 1,2%		

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Todas las dosificaciones y amasadas planteadas se fabricaron con las relaciones agua/cemento expresadas, en las que a la cantidad de agua se le ha restado la humedad de los áridos. Los datos han sido registrados el mismo día de la elaboración de los distintos hormigones.

El proceso de amasado seguido en todas las dosificaciones fabricadas en laboratorio ha sido el mismo. Inicialmente se realiza el pesado de todos los componentes y la determinación de la humedad de los áridos. Luego, los componentes del hormigón se introducen en amasadora horizontal, introduciéndolos por orden decreciente de diámetro, es decir: grava, arena basáltica, arena silícea, material incorporado si lo tuviese y cemento (figura AII.4). Se realiza entonces un mezclado en seco de los componentes durante 30 segundos, con el objeto de homogenizarlos en la amasadora antes de añadir de agua. Seguidamente se añade el agua junto con el plastificante y se amasa durante 3 minutos y finalmente se amasa otros 30 segundos tras añadir el segundo aditivo si lo tuviese (figura AII.5). Una vez que el hormigón se encuentra debidamente amasado y homogeneizado se procede a la descarga del material de la amasadora en una carretilla. Este producto final es el hormigón de amasada con el que finalmente se realiza el ensayo del cono de Abrams y fabrican todas las probetas de ensayo (figura AII.6).



**Figura AII.4.-** Introducción de los materiales en la hormigonera horizontal.



**Figura AII.5.-** Proceso de amasado.



**Figura AII.6.-**Descarga del hormigón y realización del cono de Abrams.

### Referencias.

- [1] REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.
- [2] M. Fernández Cánovas, Hormigón, Imprime Rugarte, S.L., Madrid, 2002.
- [3] AENOR. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. UNE-EN 933-1. AENOR. Madrid, 2012.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## Anexo III

### Medidas de porosidad por intrusión de mercurio

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

## **ANEXO III**

### **MEDIDAS DE POROSIDAD POR INTRUSIÓN DE MERCURIO**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 927280 Código de verificación: 1tJxZHC8

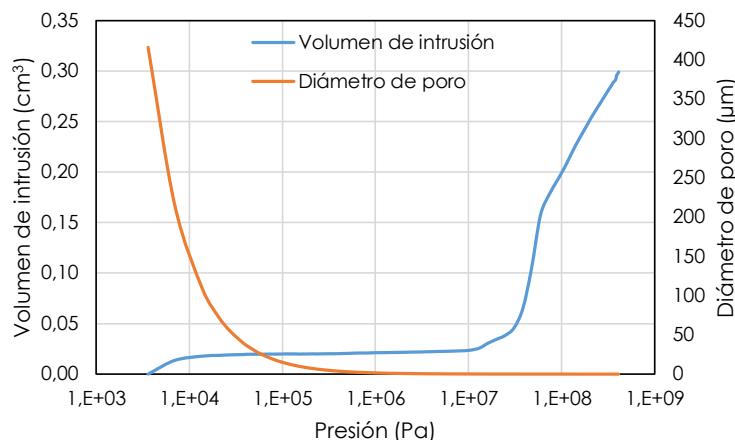
Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

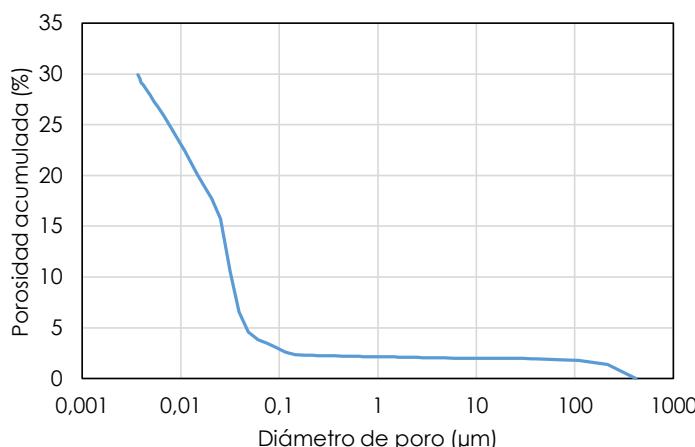
Identificador del documento: 927280

Código de verificación: 1tJxZHC8

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

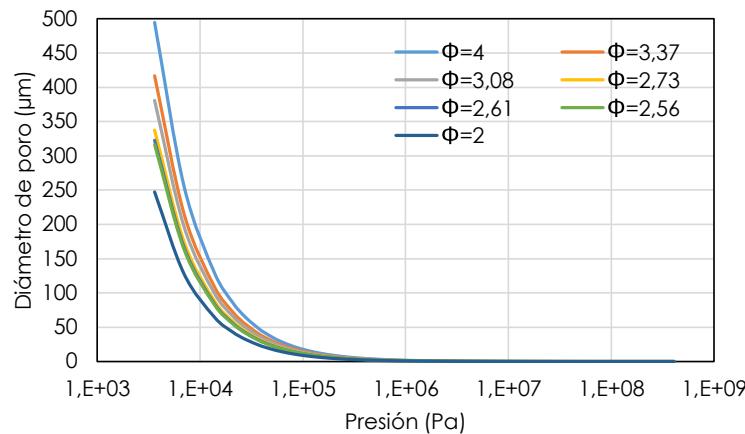


**Figura AIII-1.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

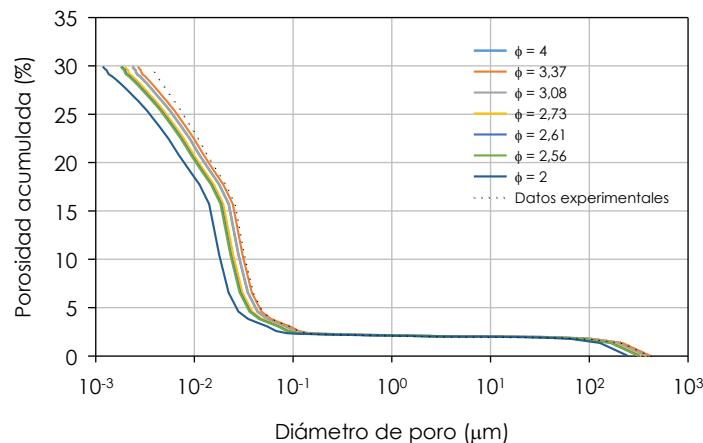


**Figura AIII-2.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



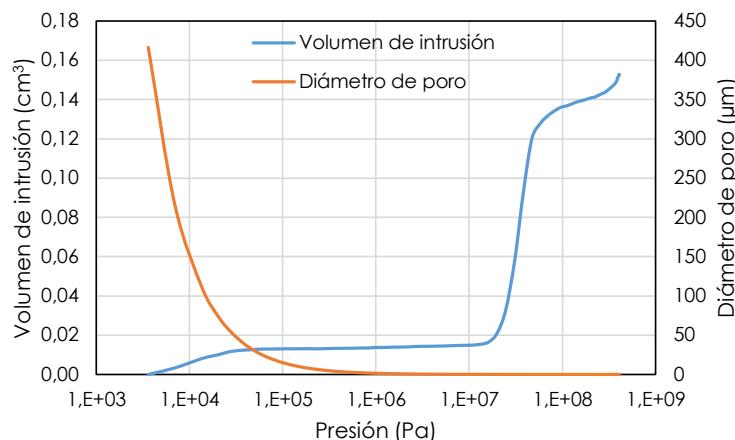
a)



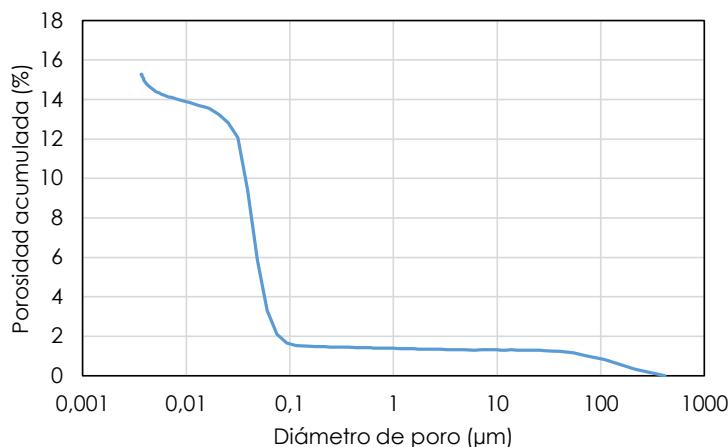
b)

**Figura AIII-3.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

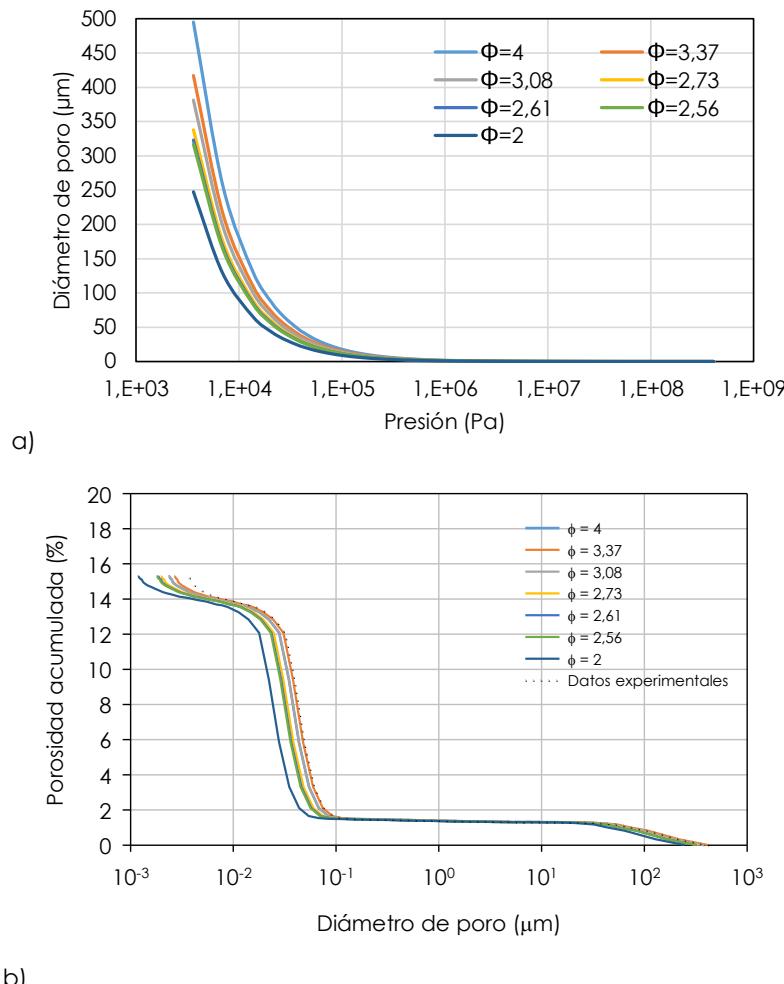


**Figura AIII-4.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .



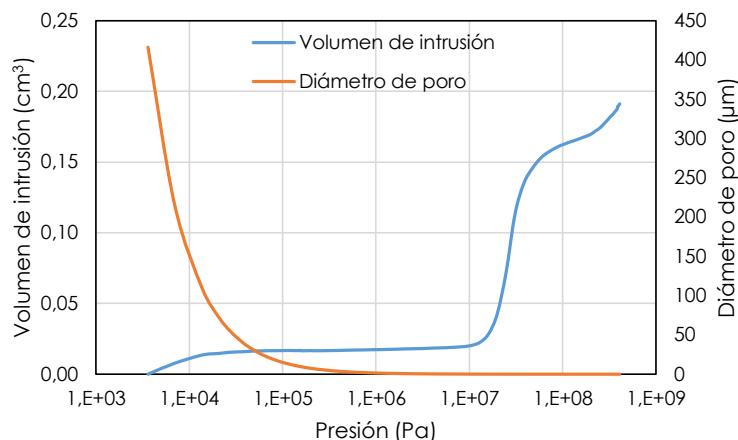
**Figura AIII-5.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

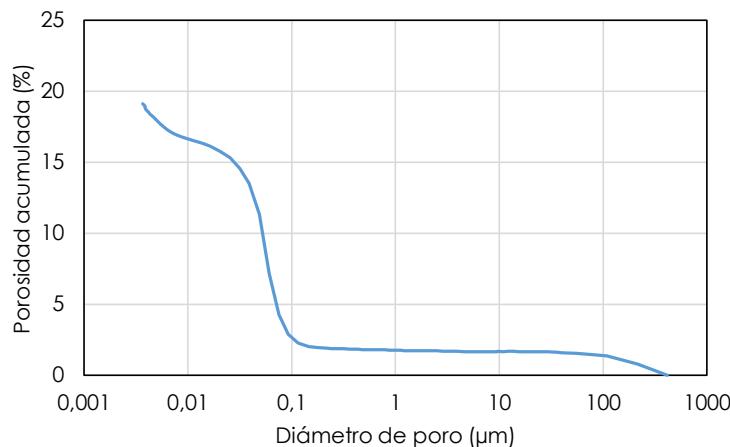


**Figura AIII-6.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

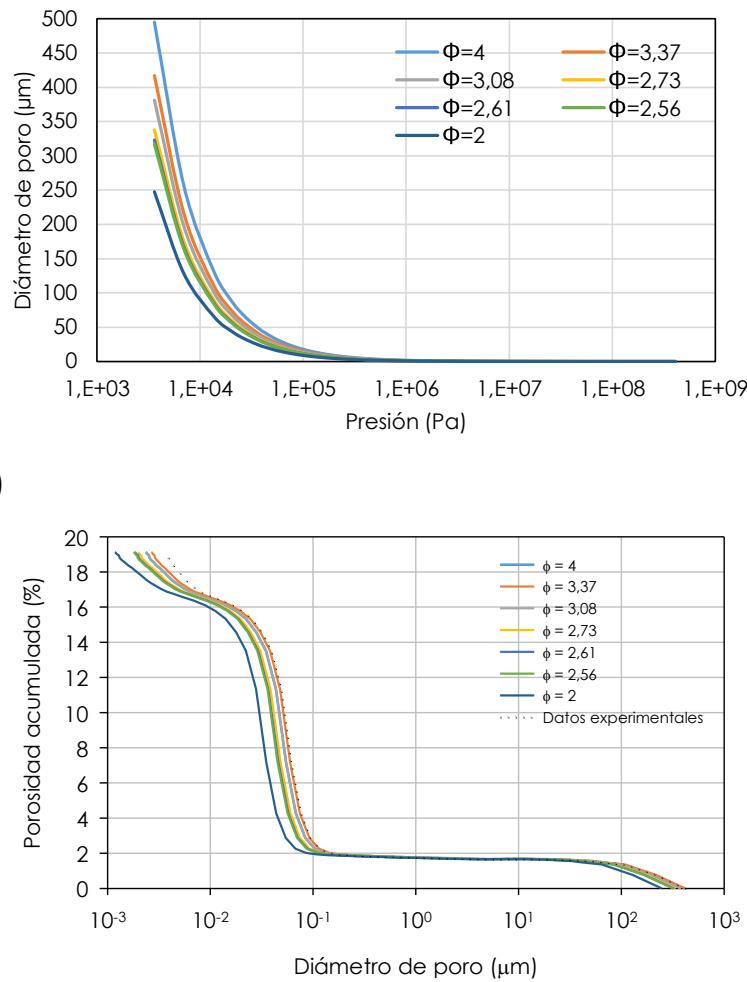


**Figura AIII-7.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C3. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .



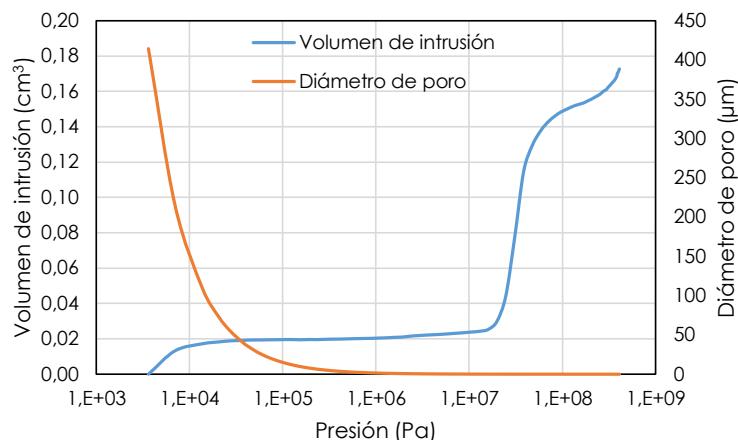
**Figura AIII-8.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C3. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

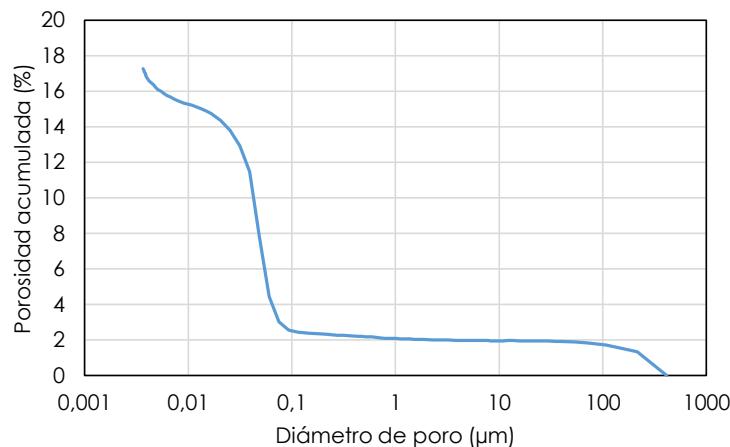


**Figura AIII-9.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C3. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

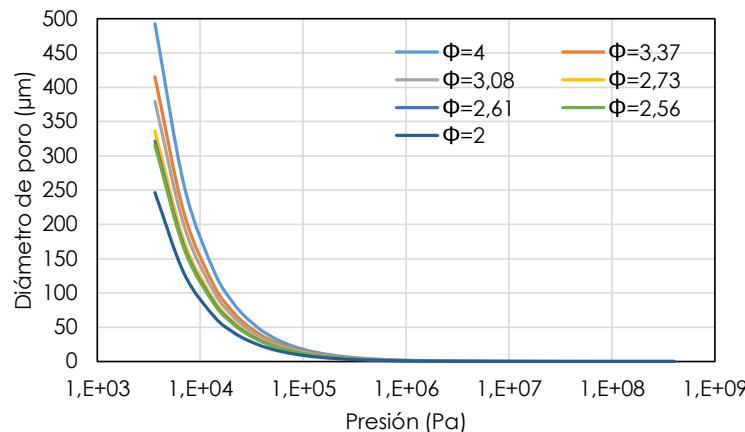


**Figura AIII-10.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C4. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

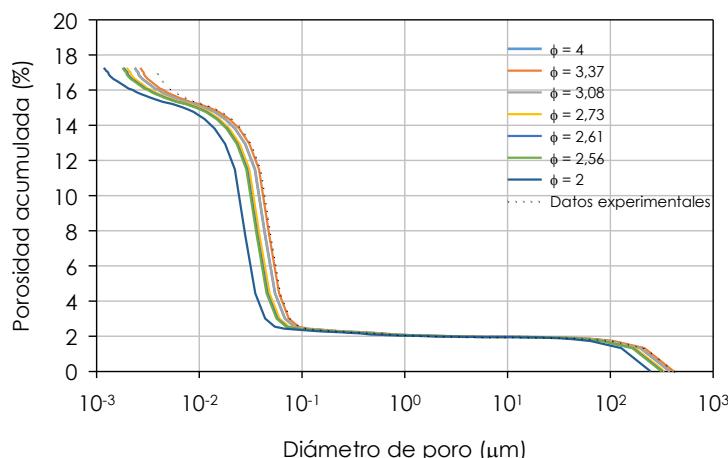


**Figura AIII-11.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C4. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



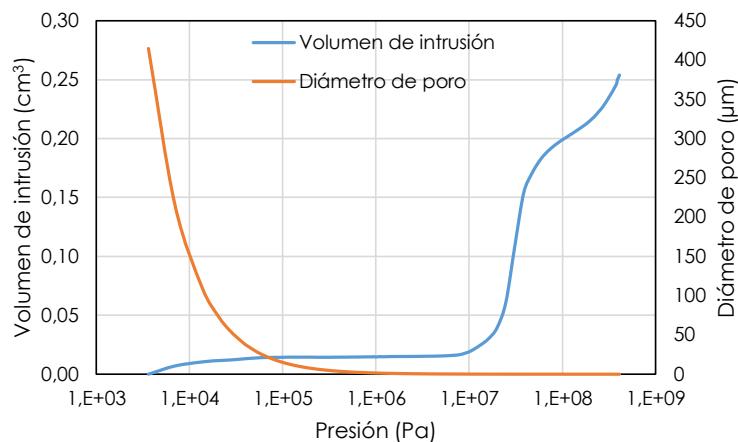
a)



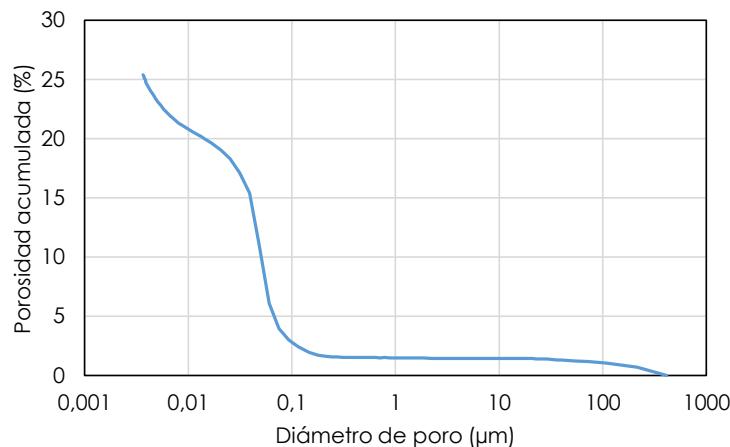
b)

**Figura AIII-12.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C4. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

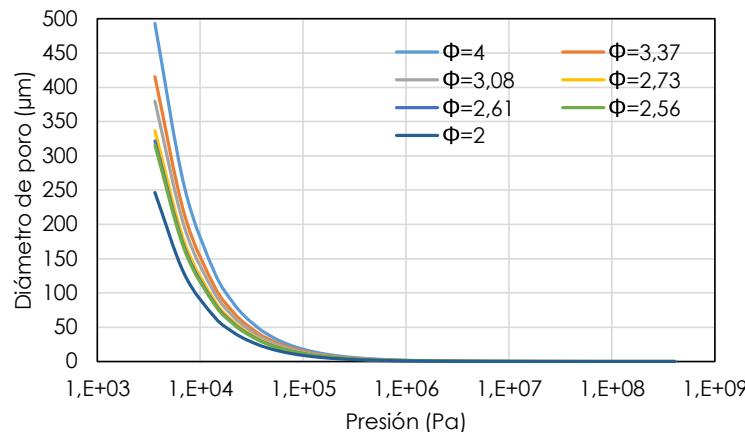


**Figura AIII-13.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C5. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

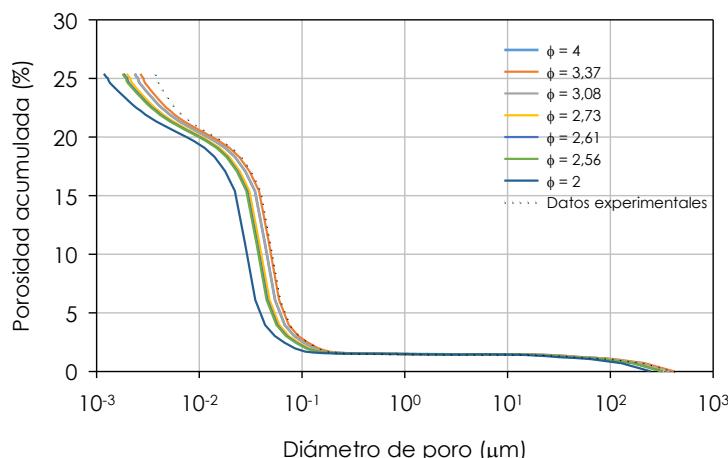


**Figura AIII-14.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C5. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



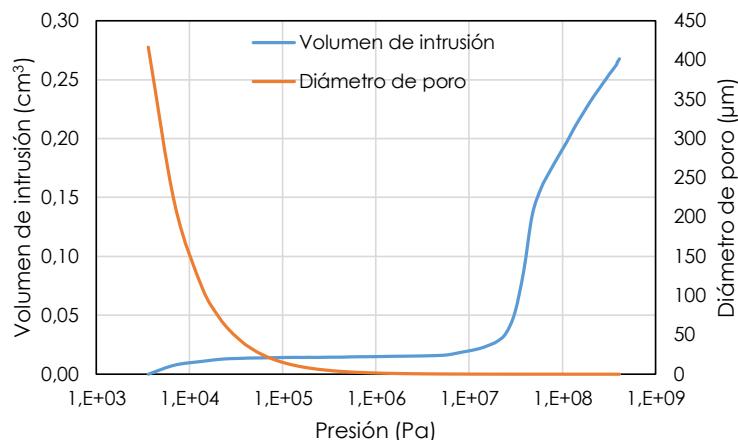
a)



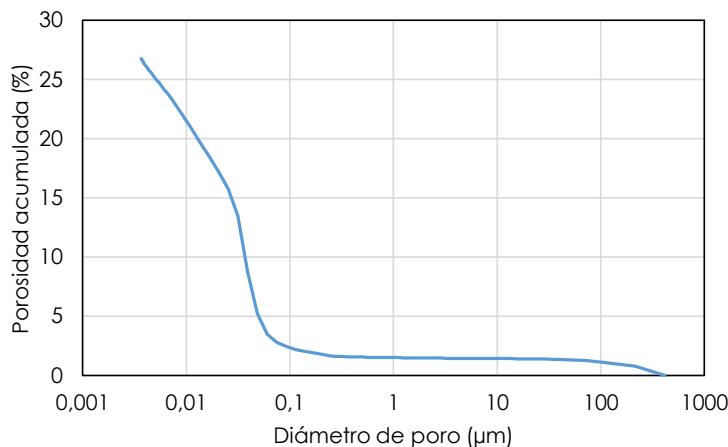
b)

**Figura AIII-15.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C5. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

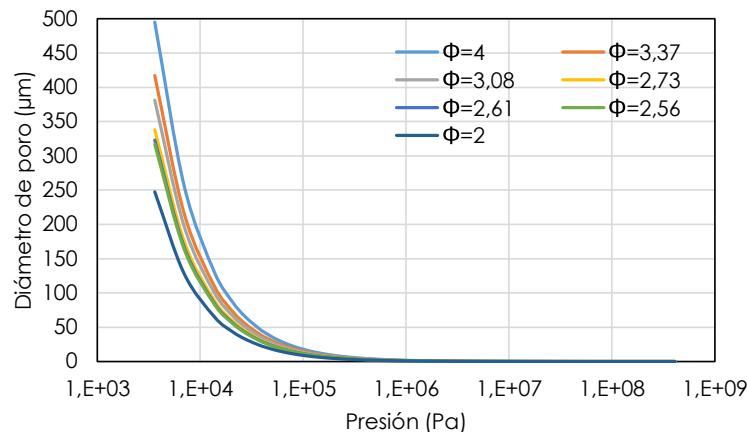


**Figura AIII-16.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra C6. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

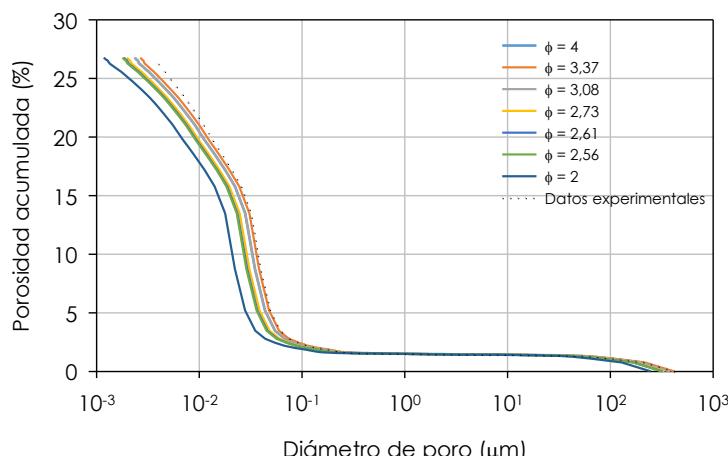


**Figura AIII-17.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra C6. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



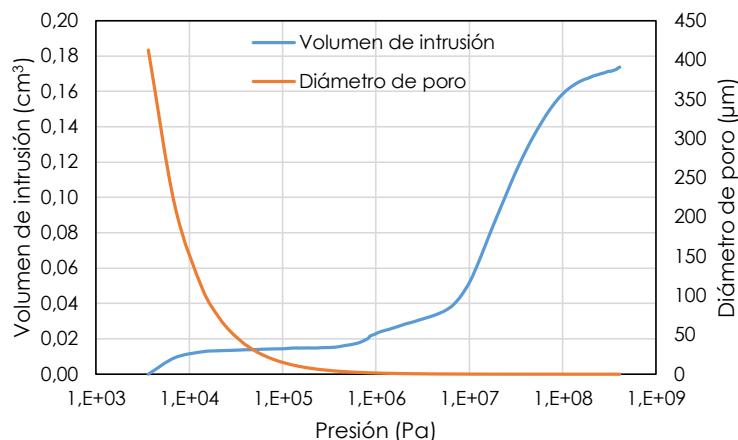
a)



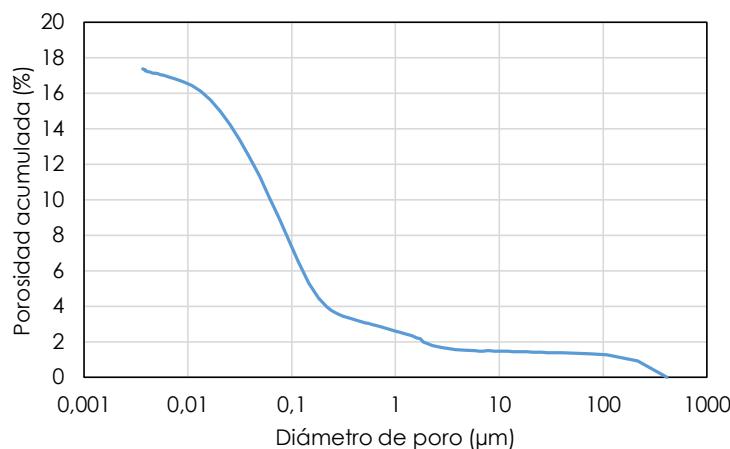
b)

**Figura AIII-18.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra C6. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

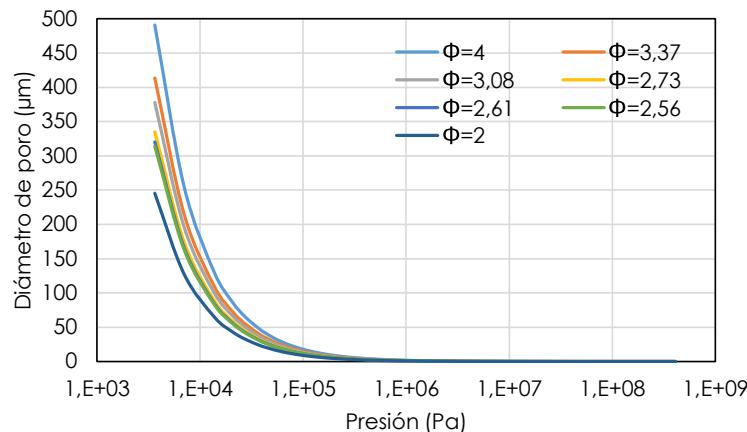


**Figura AIII-19.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

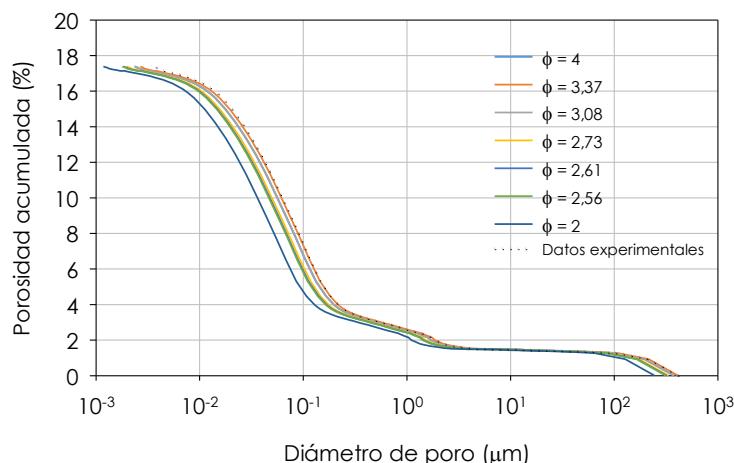


**Figura AIII-20.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



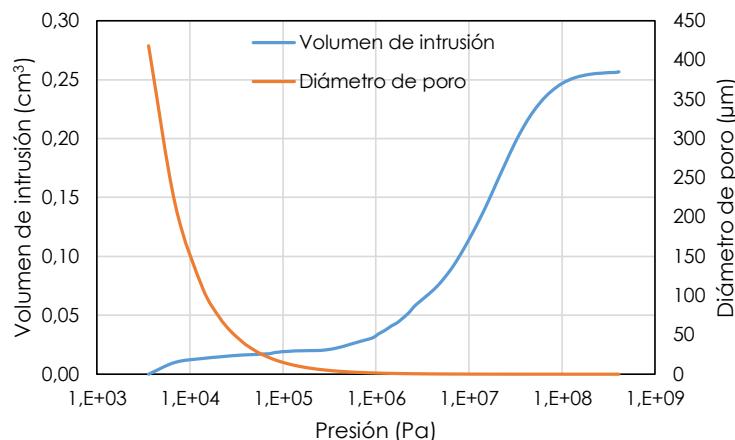
a)



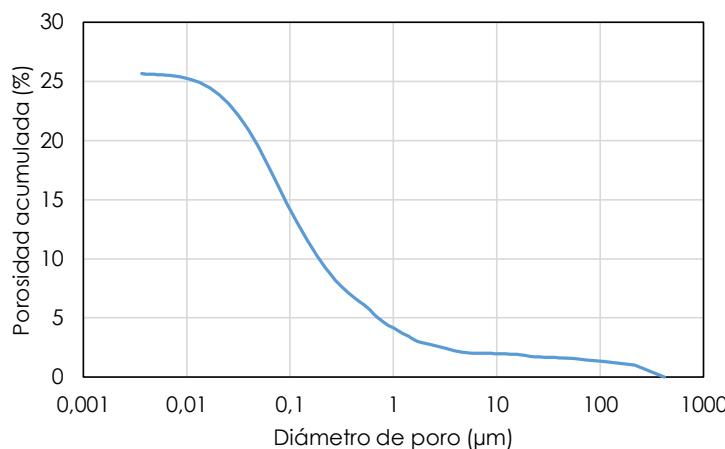
b)

**Figura AIII-21.- a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H1. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.**

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

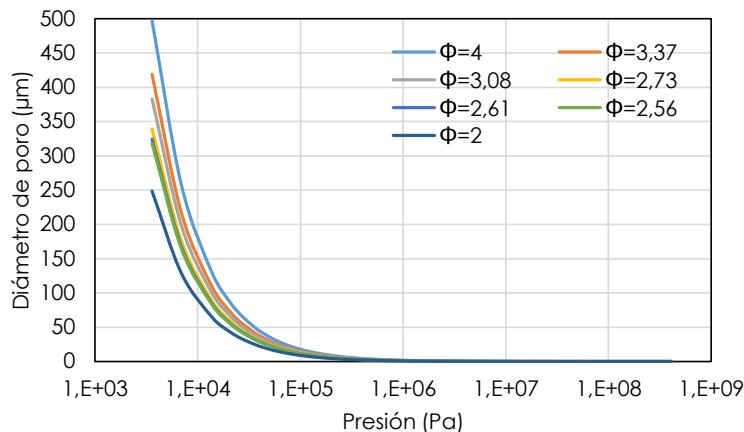


**Figura AIII-22.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

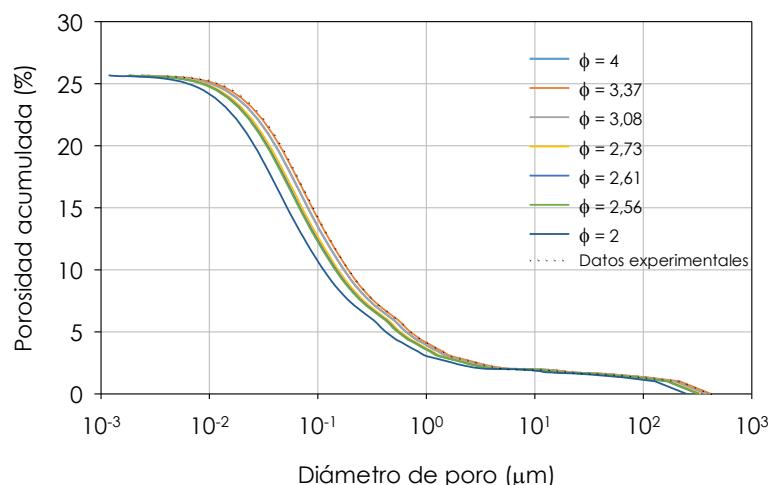


**Figura AIII-23.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



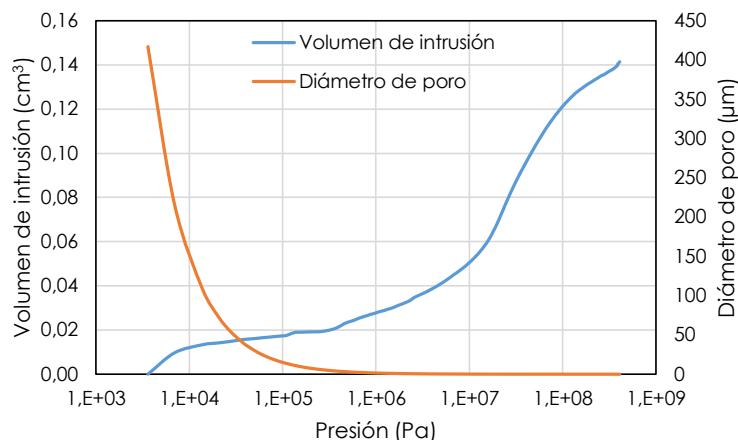
a)



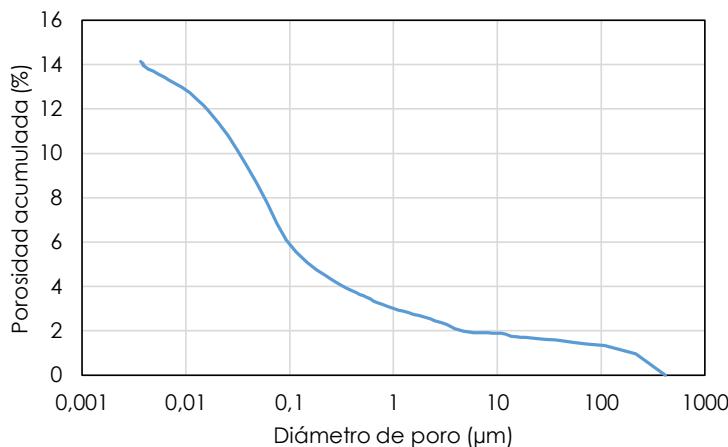
b)

**Figura AIII-24.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H2. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

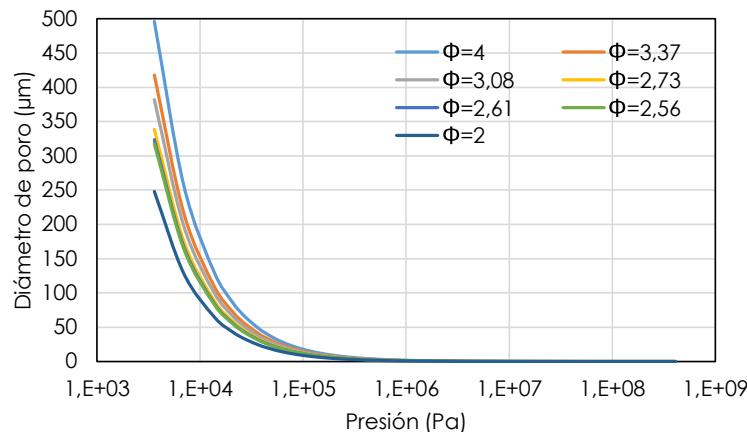


**Figura AIII-25.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H9. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

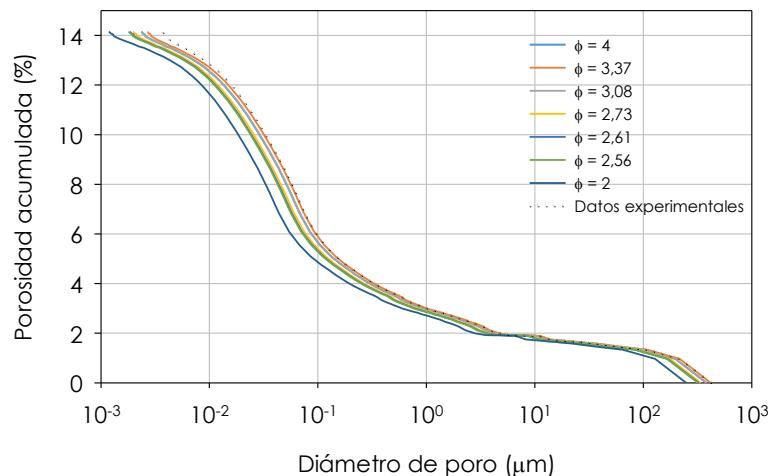


**Figura AIII-26.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H9. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

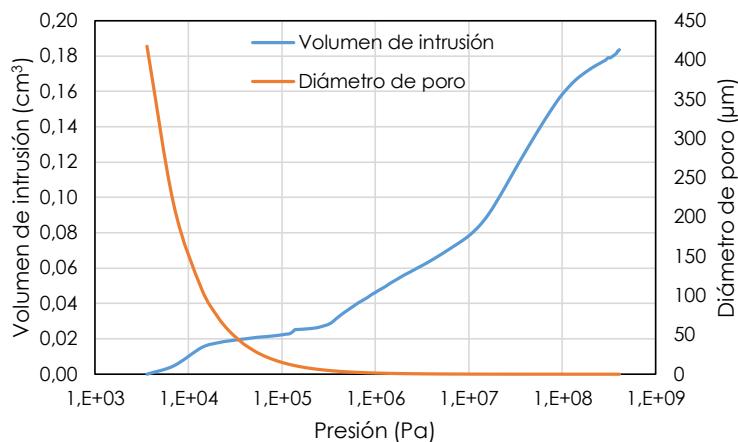


a)

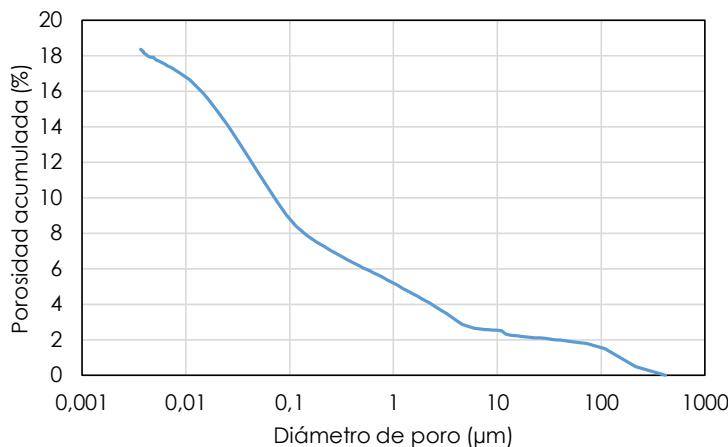


b)

**Figura AIII-27.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H9. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

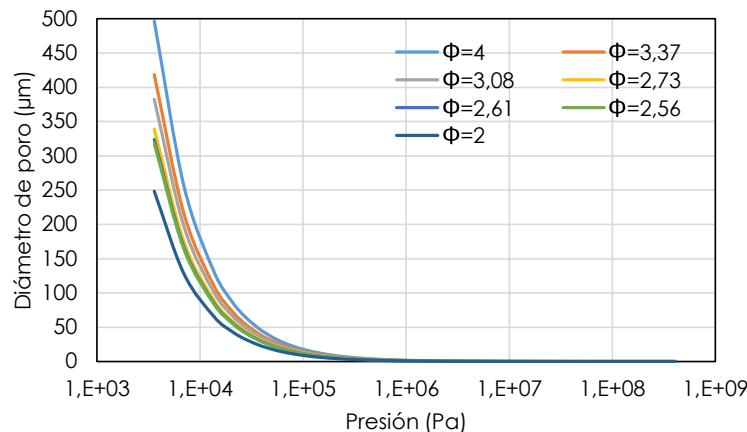


**Figura AIII-28.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H12. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

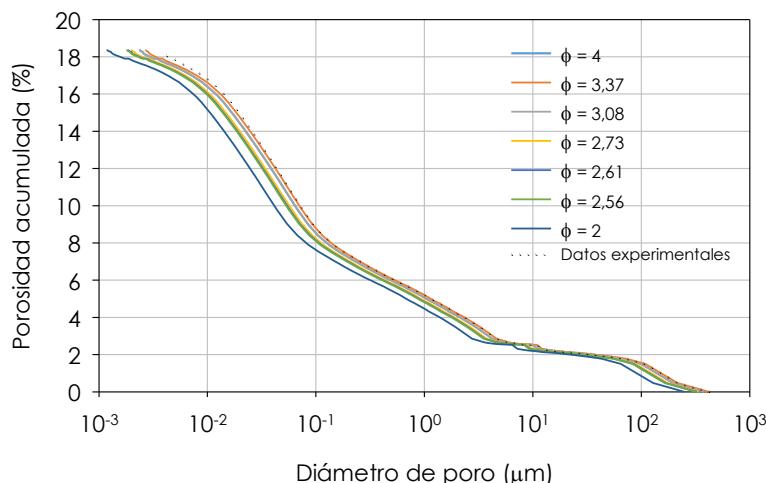


**Figura AIII-29.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H12. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



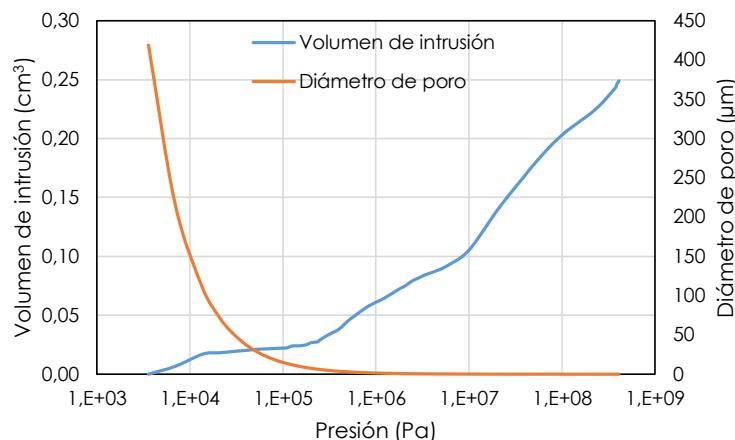
a)



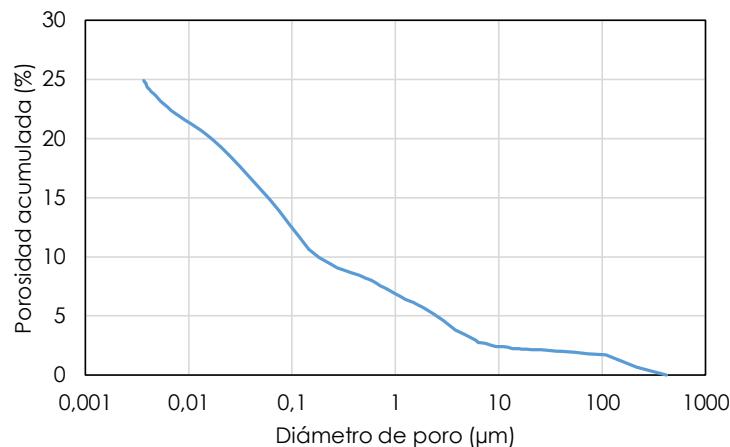
b)

**Figura AIII-30.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H12. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	

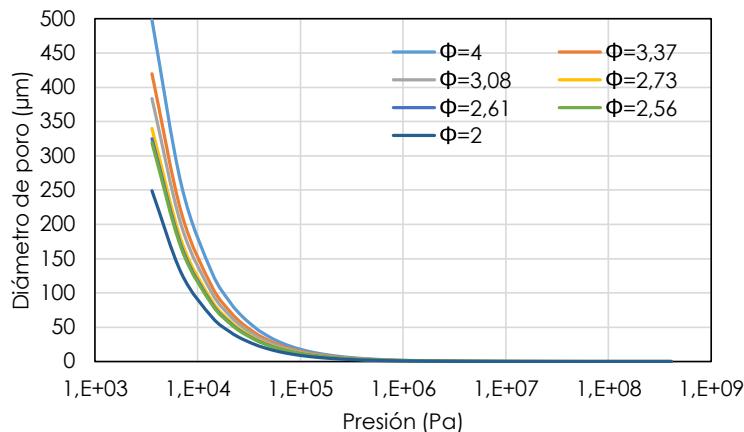


**Figura AIII-31.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H15. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

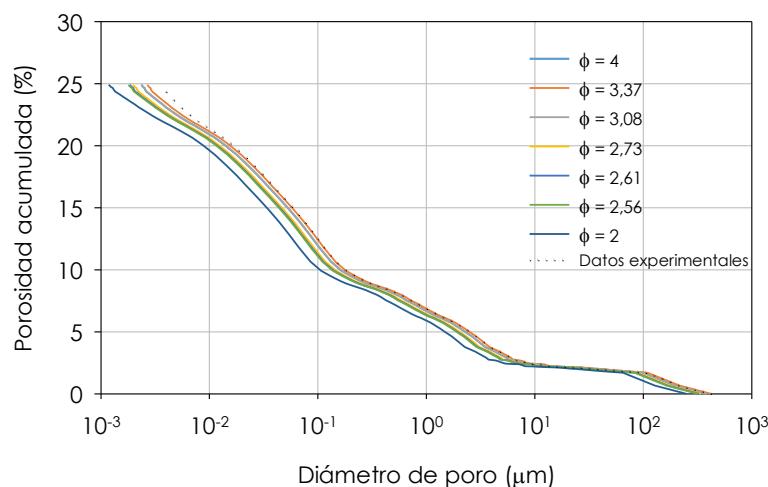


**Figura AIII-32.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H15. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

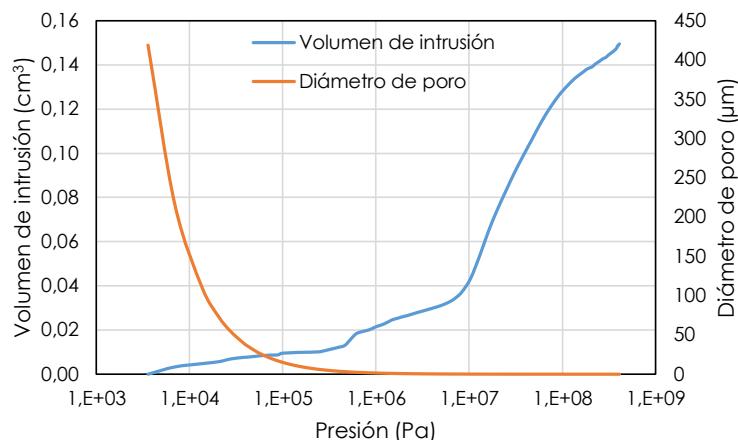


a)

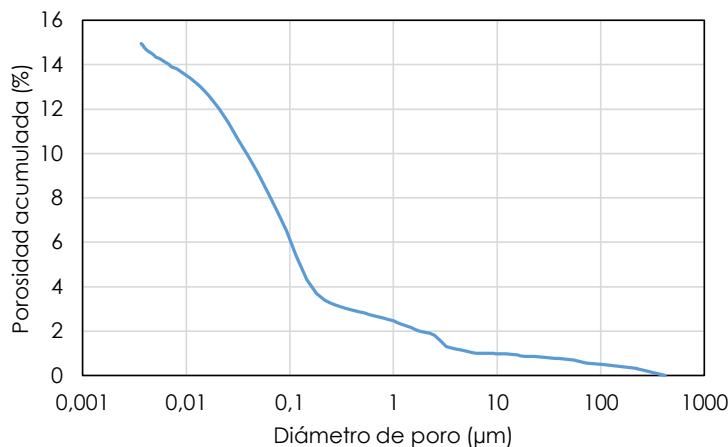


b)

**Figura AIII-33.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H15. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

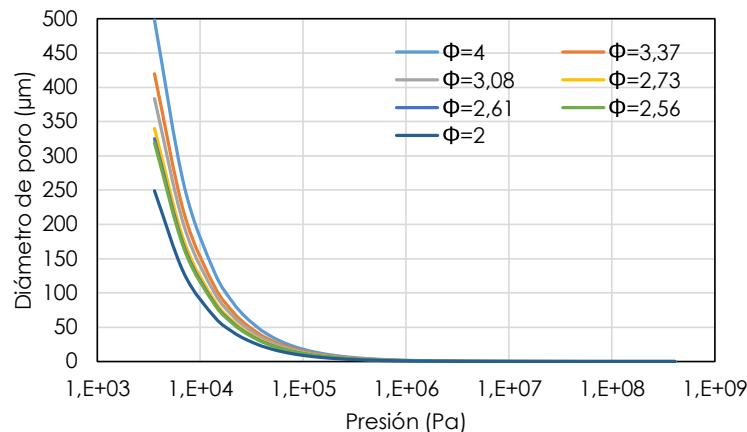


**Figura AIII-34.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H16. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

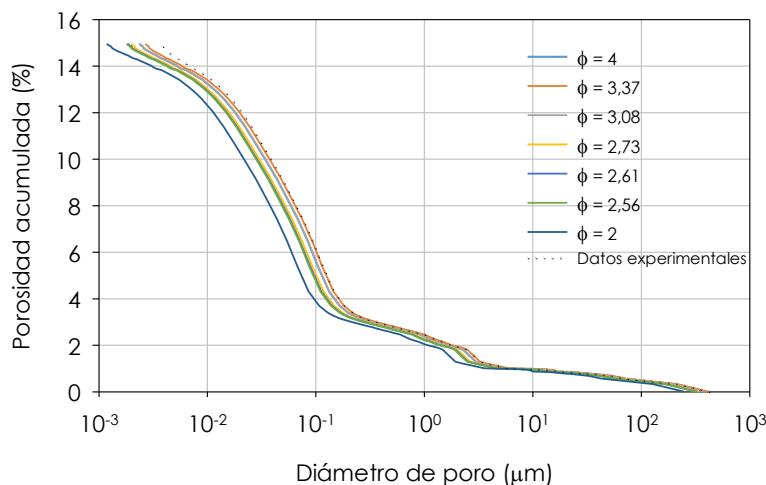


**Figura AIII-35.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H16. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

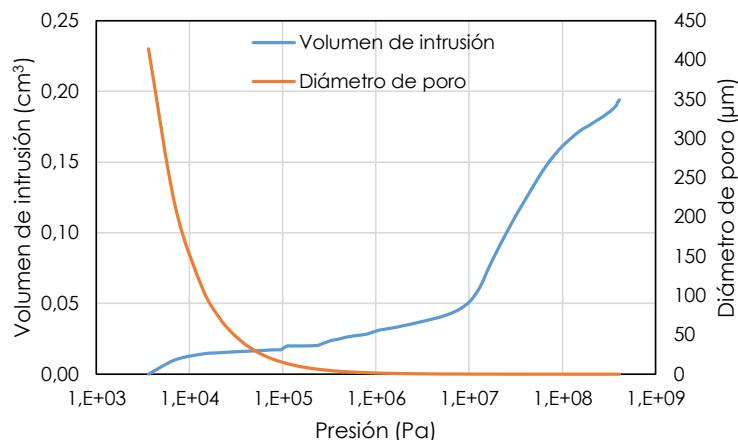


a)

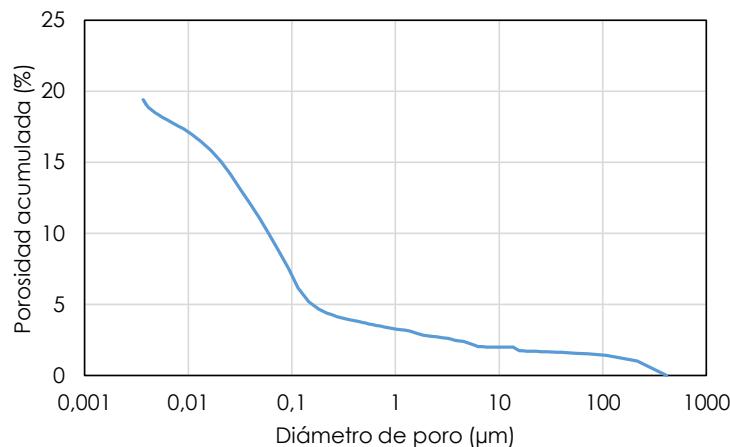


b)

**Figura AIII-36.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H16. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

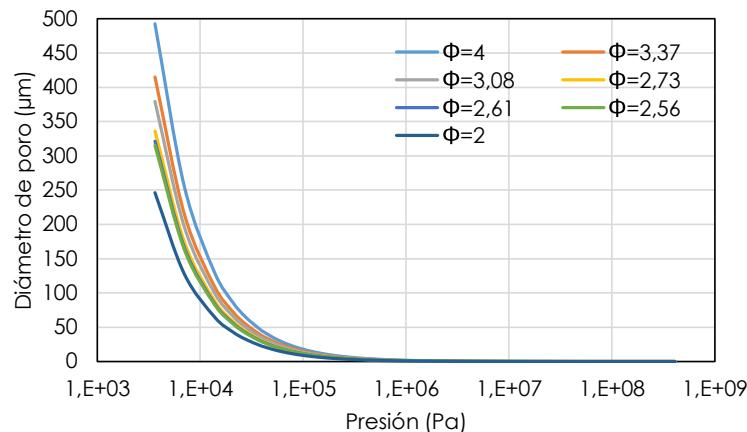


**Figura AIII-37.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H17. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

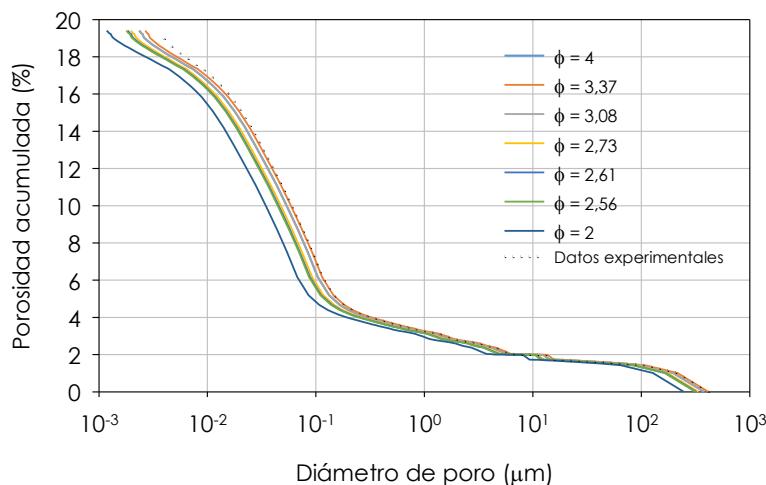


**Figura AIII-38.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H17. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



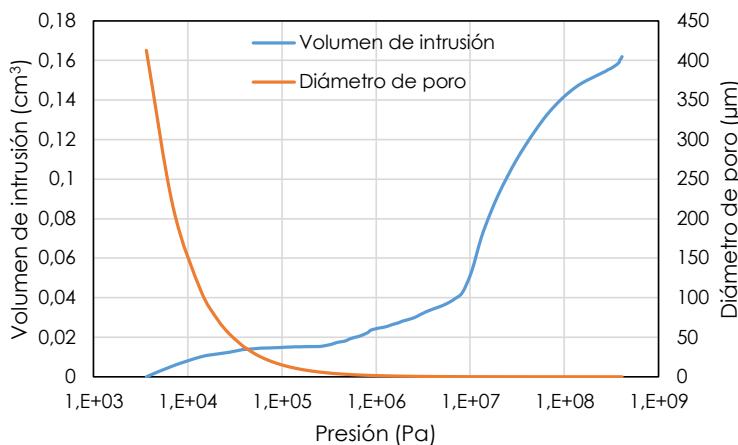
a)



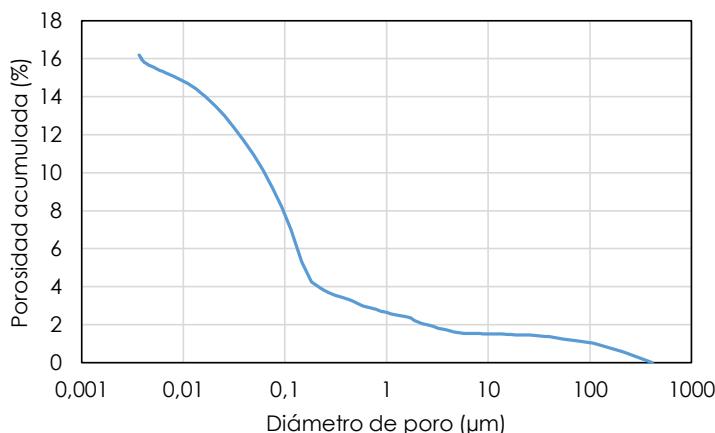
b)

**Figura AIII-39.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H17. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

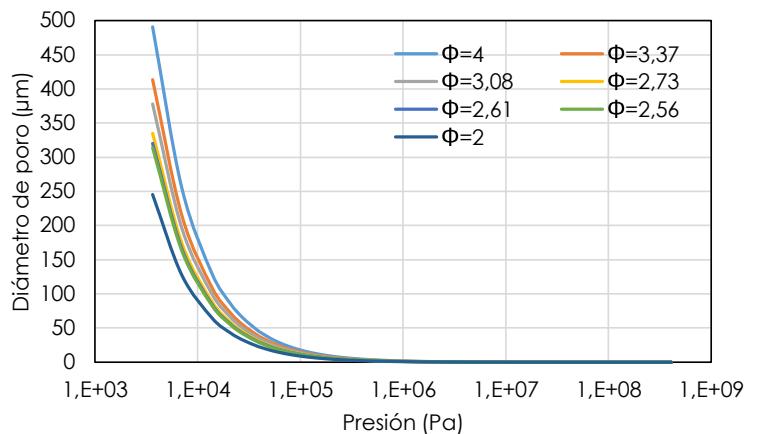


**Figura AIII-40.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

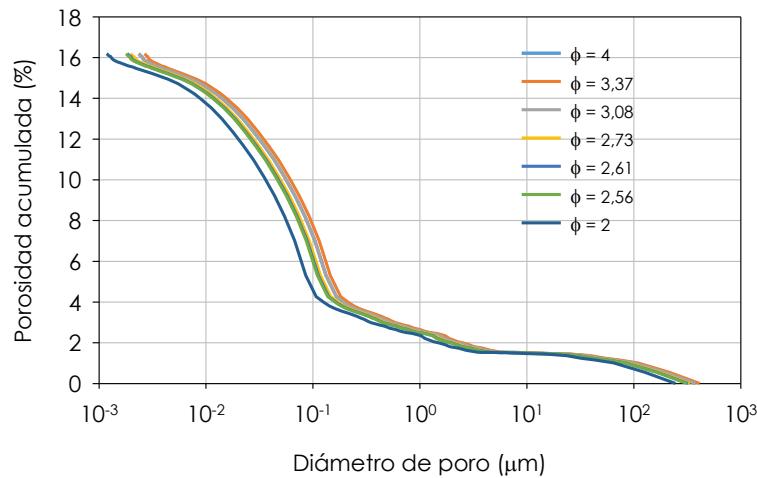


**Figura AIII-41.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

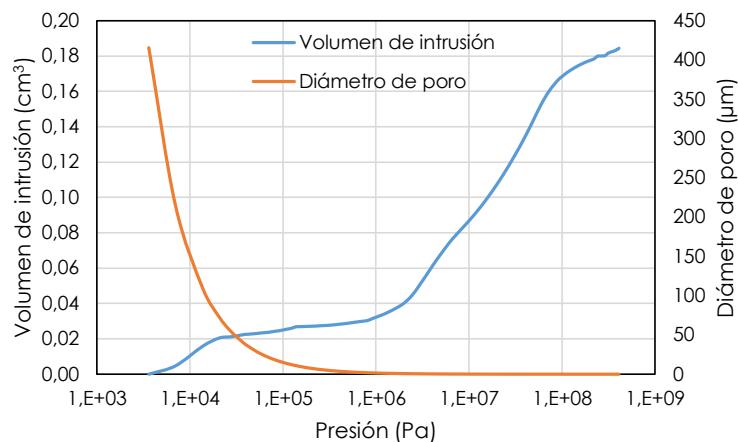


a)

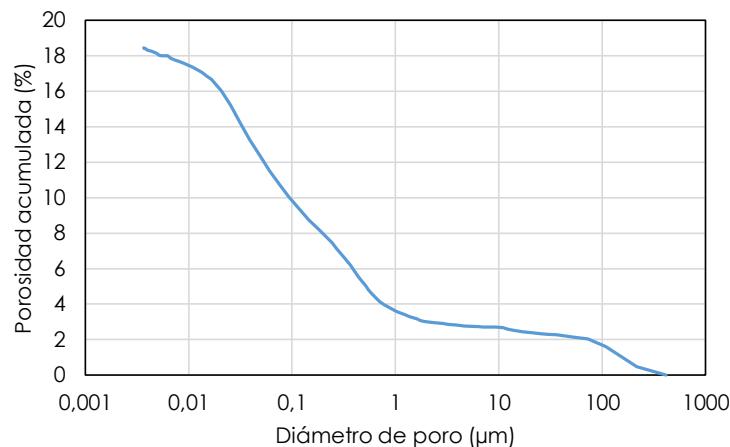


b)

**Figura AIII-42.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H18. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

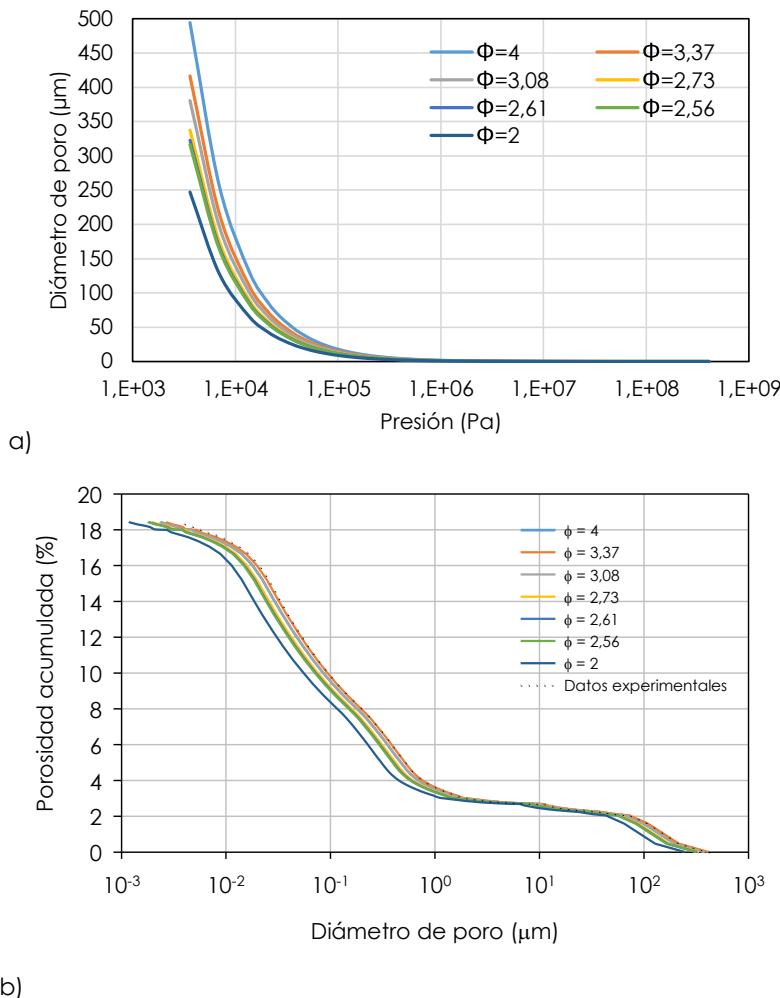


**Figura AIII-43.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H20. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .



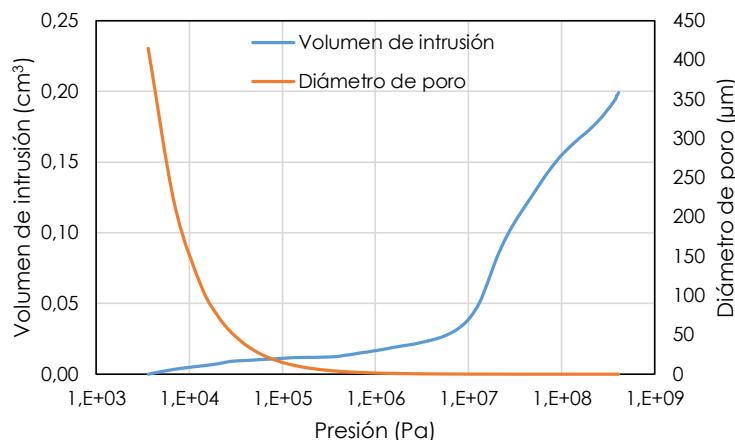
**Figura AIII-44.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H20. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

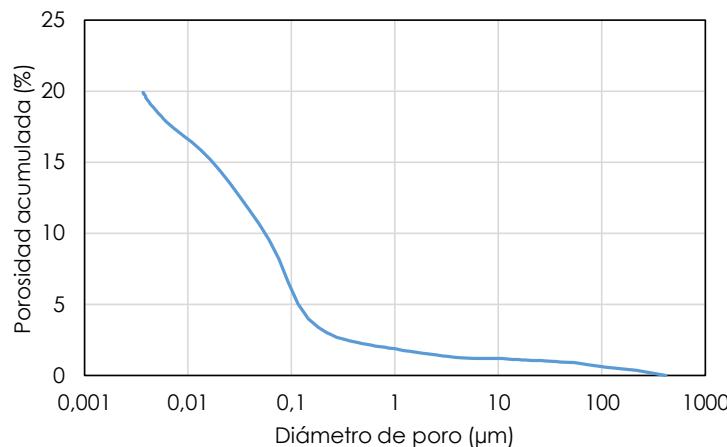


**Figura AIII-45.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H20. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

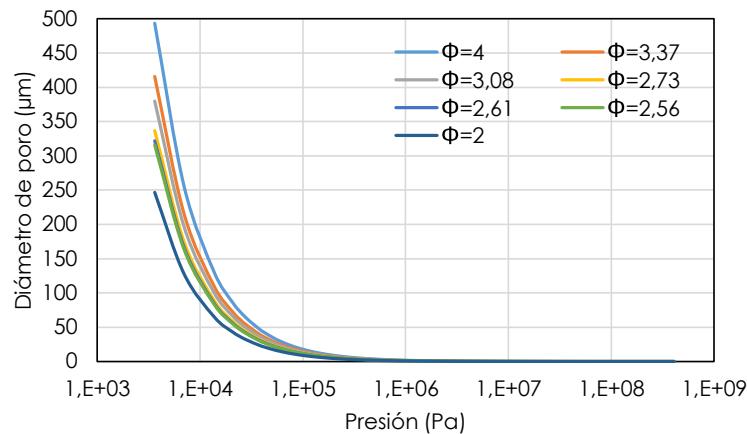


**Figura AIII-46.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H21. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

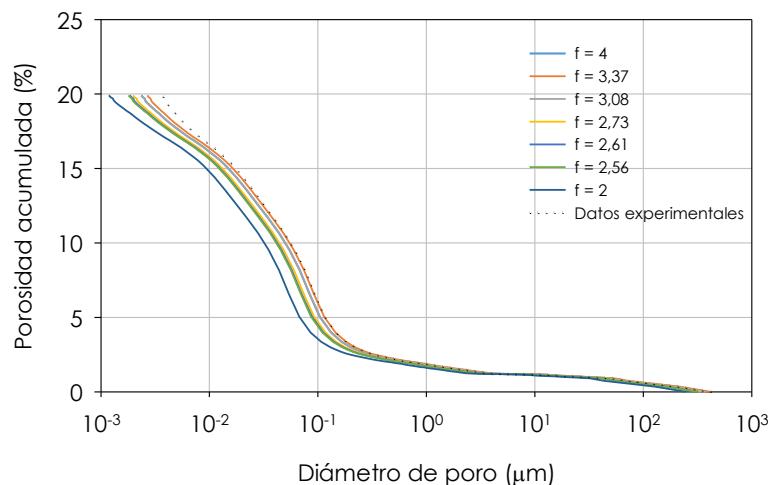


**Figura AIII-47.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H21. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



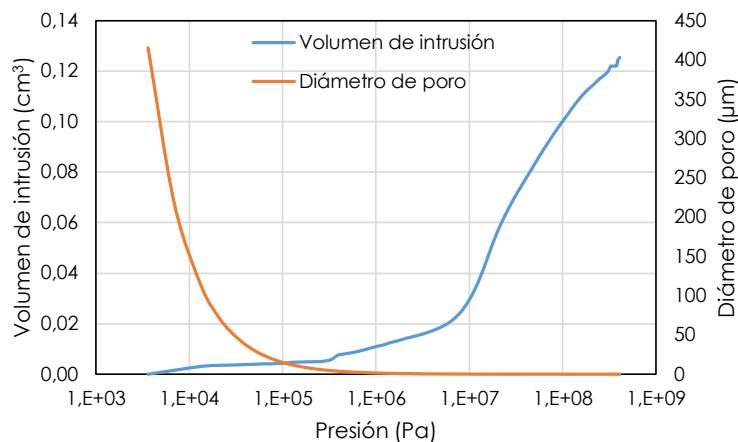
a)



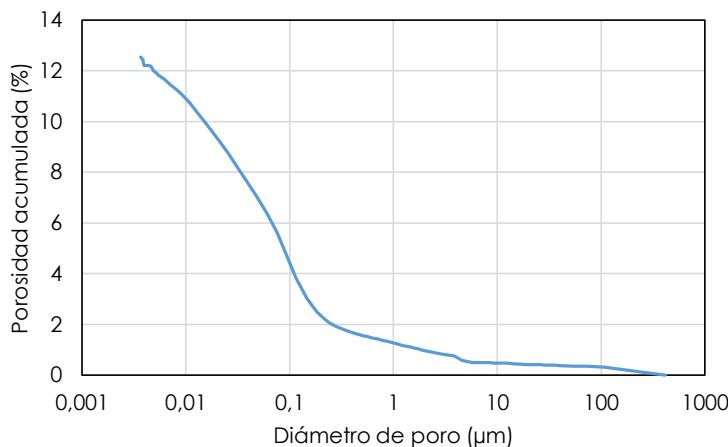
b)

**Figura AIII-48.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H21. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

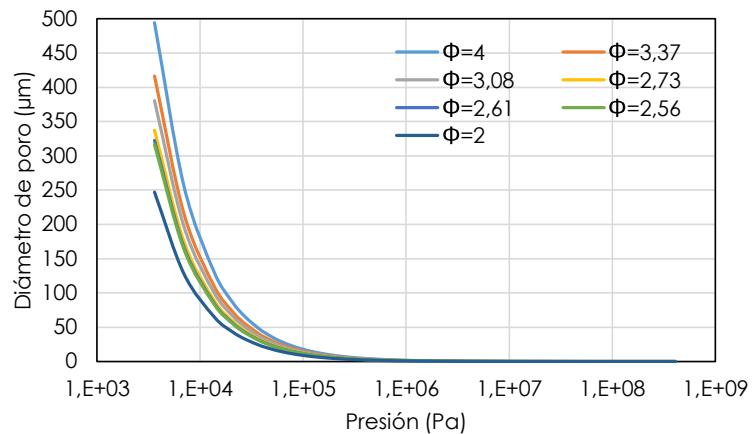


**Figura AIII-49.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H22. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

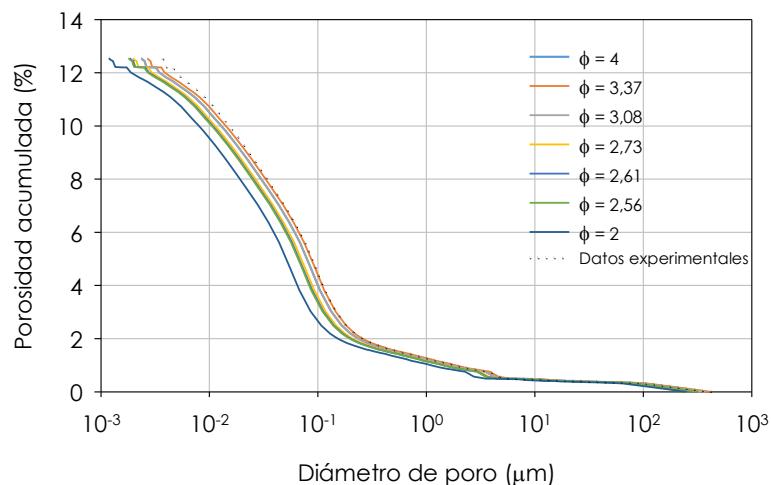


**Figura AIII-50.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H22. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

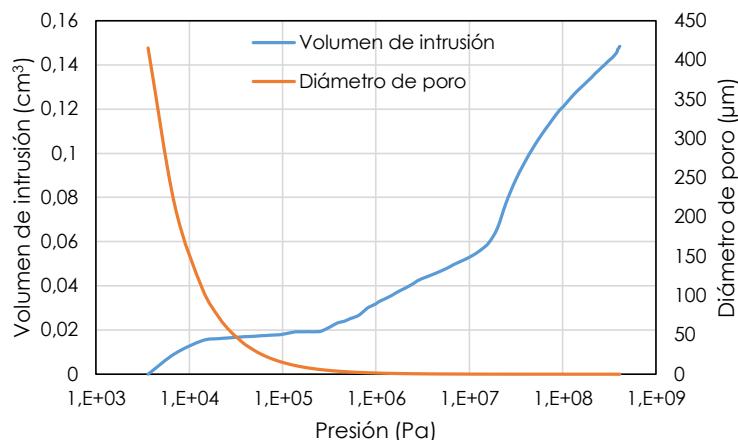


a)

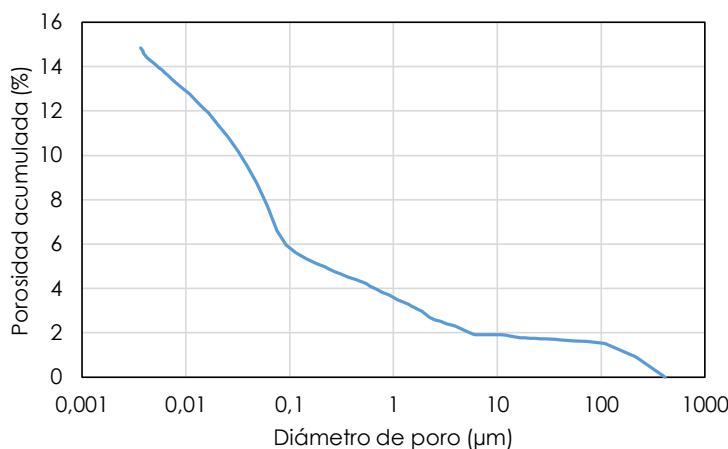


b)

**Figura AIII-51.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H22. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

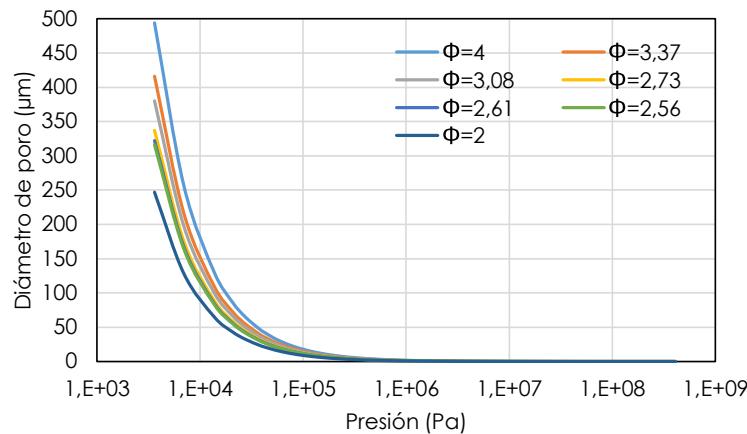


**Figura AIII-52.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H32. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

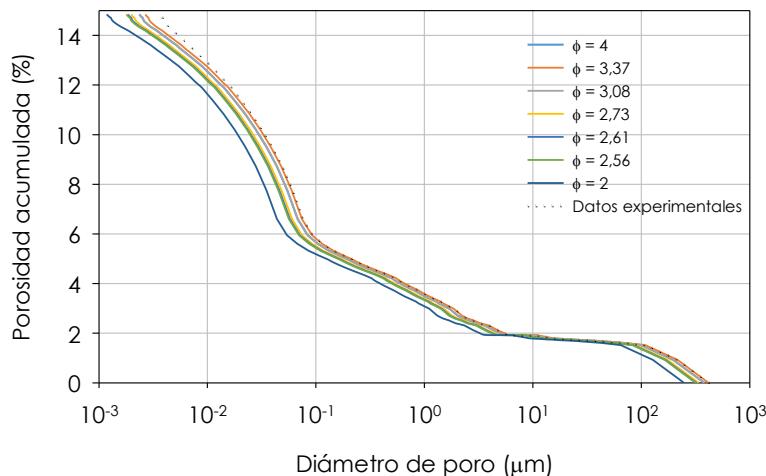


**Figura AIII-53.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H32. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

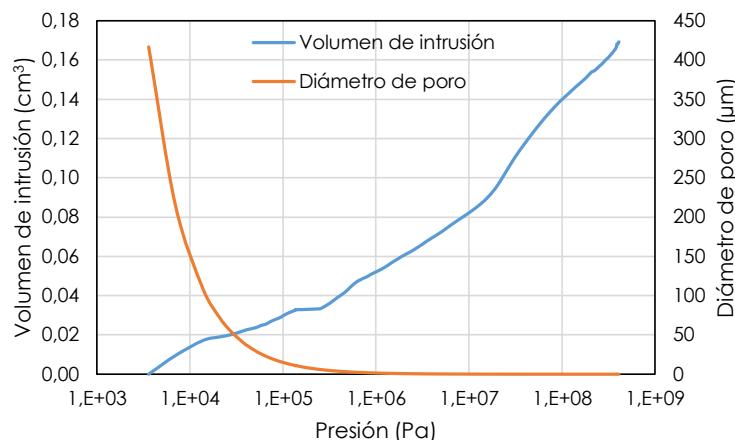


a)

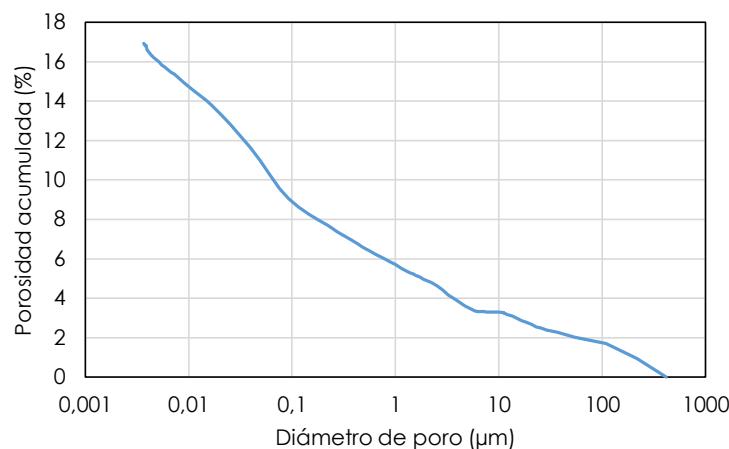


b)

**Figura AIII-54.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H32. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

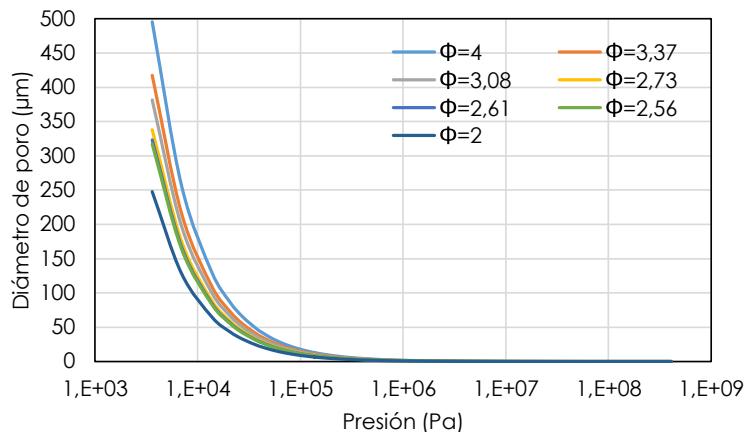


**Figura AIII-55.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H34. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

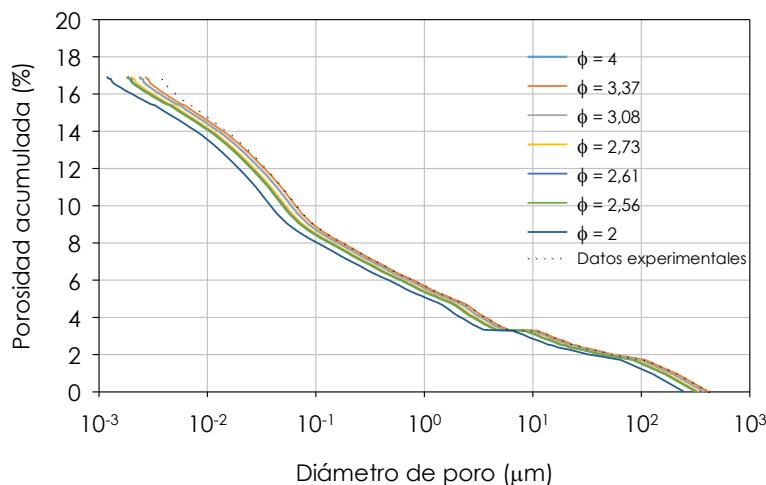


**Figura AIII-56.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H34. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



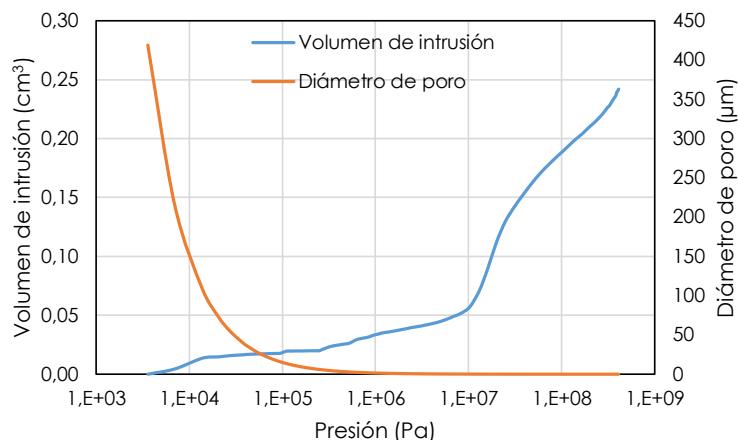
a)



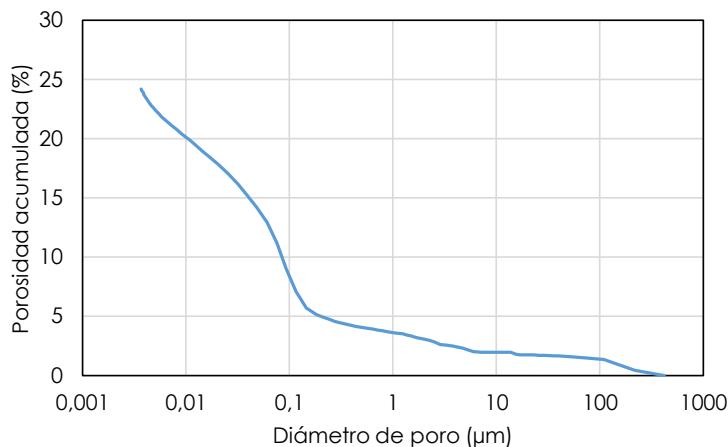
b)

**Figura AIII-57.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H34. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

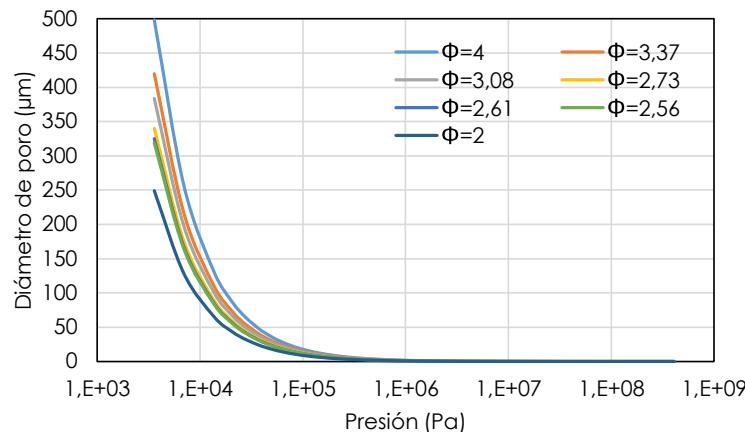


**Figura AIII-58.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H36. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

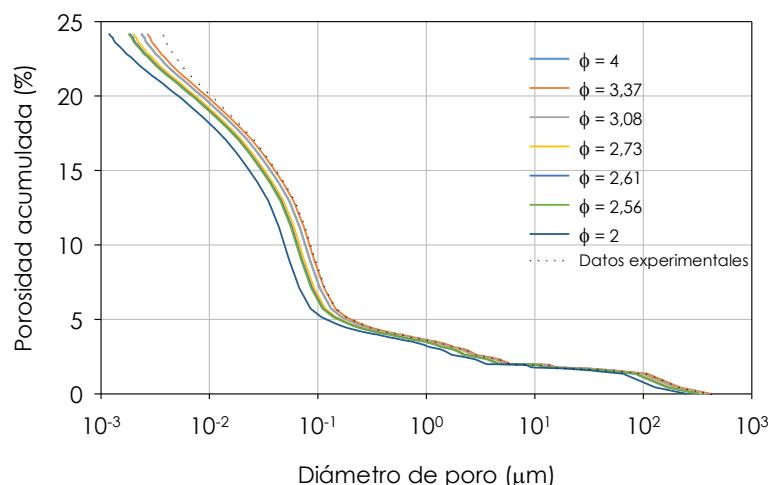


**Figura AIII-59.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H36. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

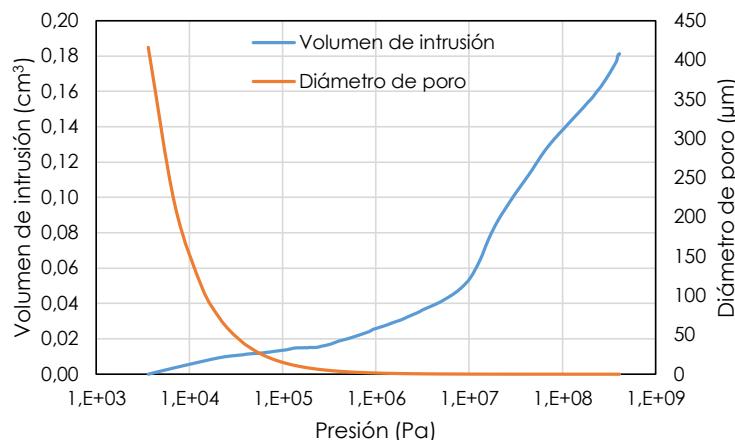


a)

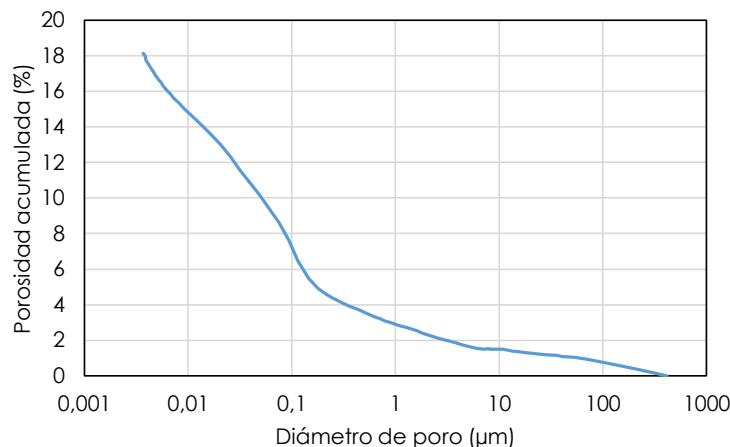


b)

**Figura AIII-60.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H36. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

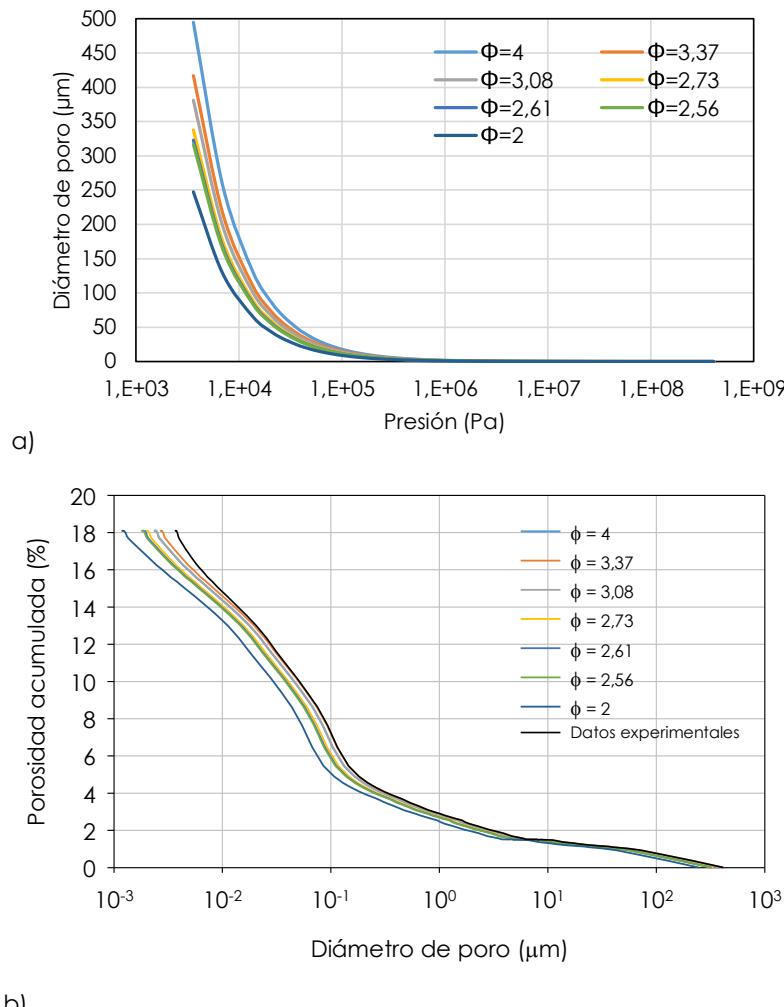


**Figura AIII-61.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H37. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .



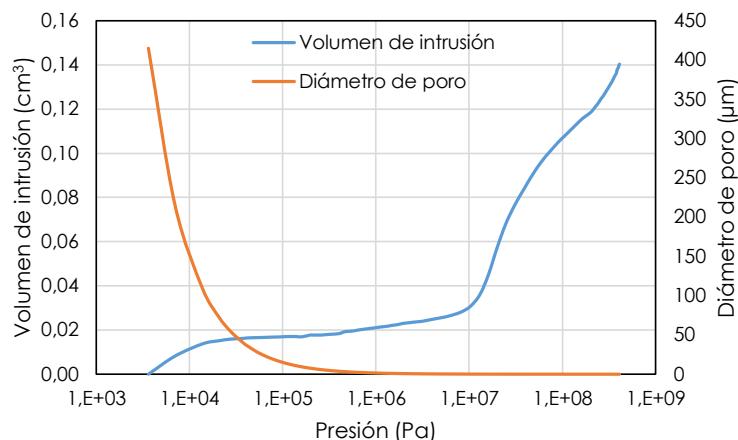
**Figura AIII-62.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H37. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

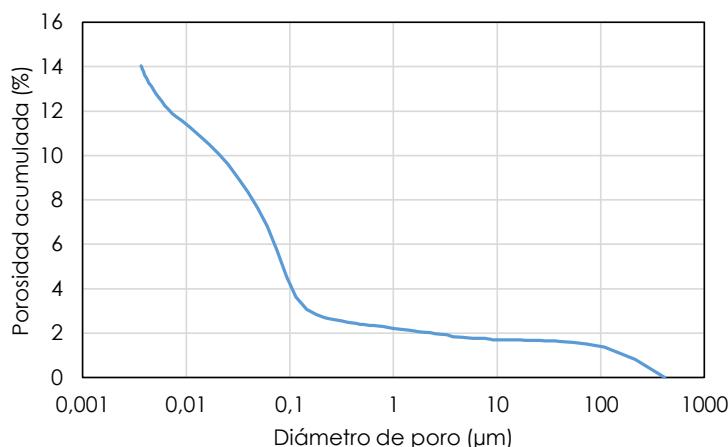


**Figura AIII-63.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H37. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

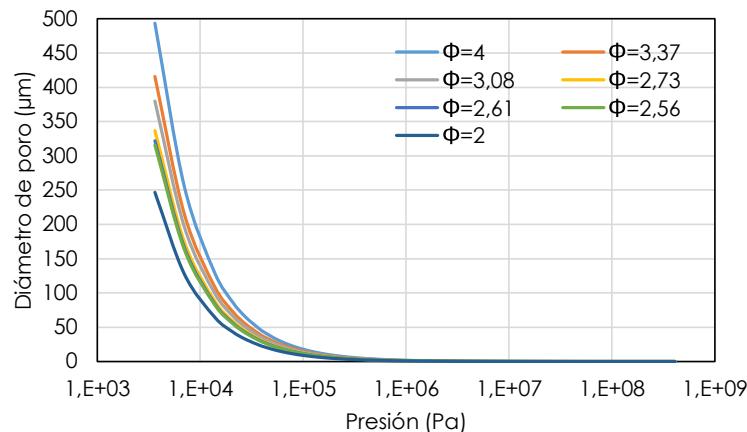


**Figura AIII-64.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H38. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

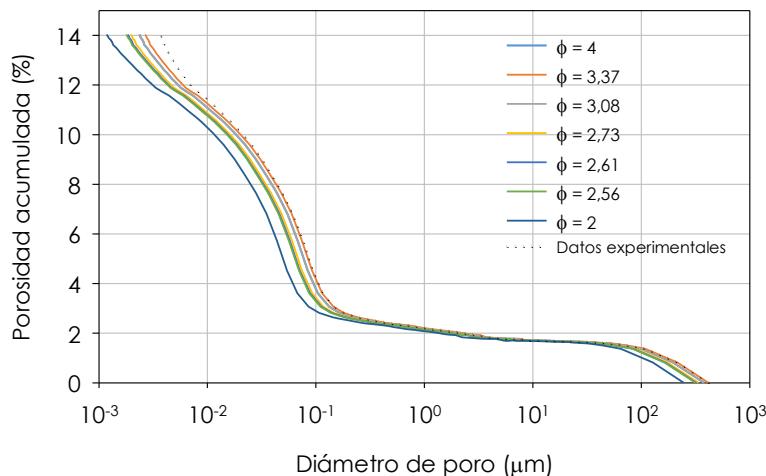


**Figura AIII-65.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H38. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

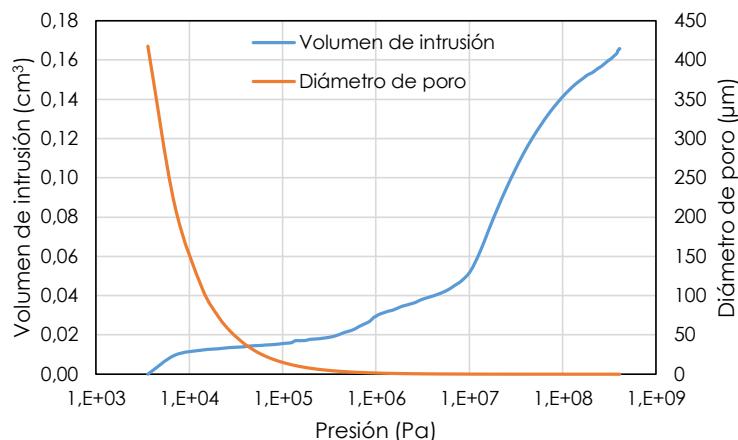


a)

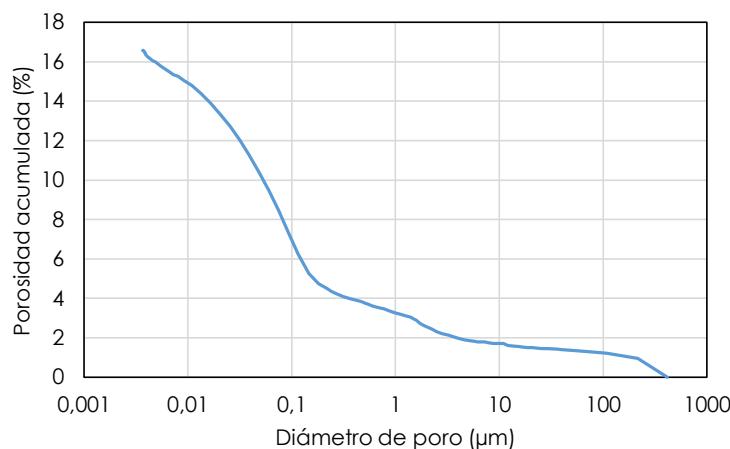


b)

**Figura AIII-66.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H38. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

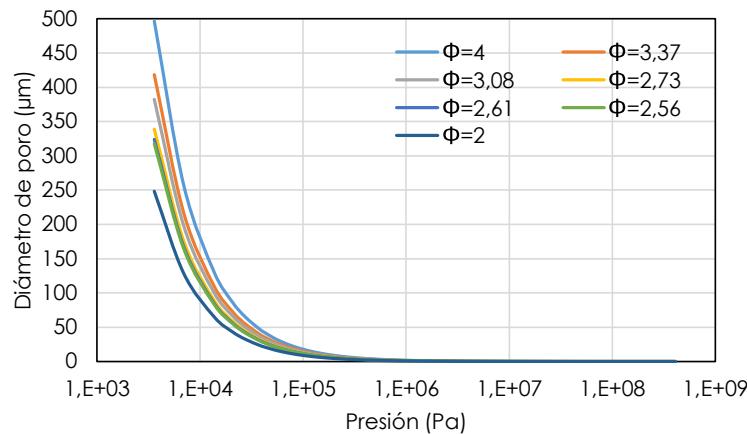


**Figura AIII-67.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H39. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

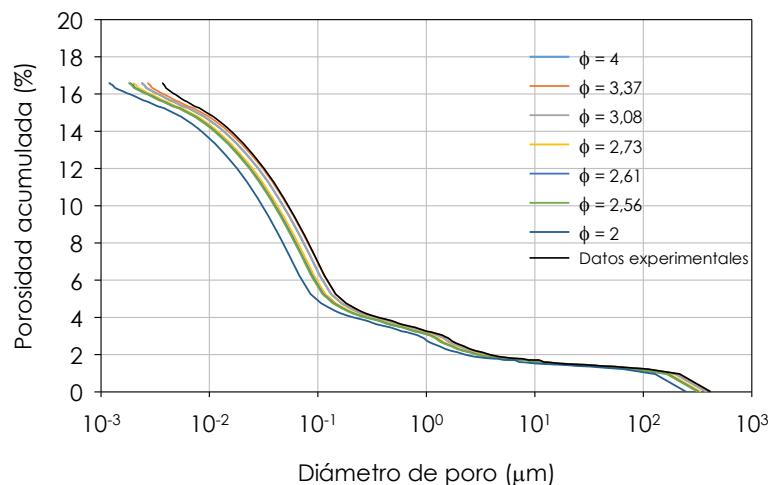


**Figura AIII-68.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H39. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



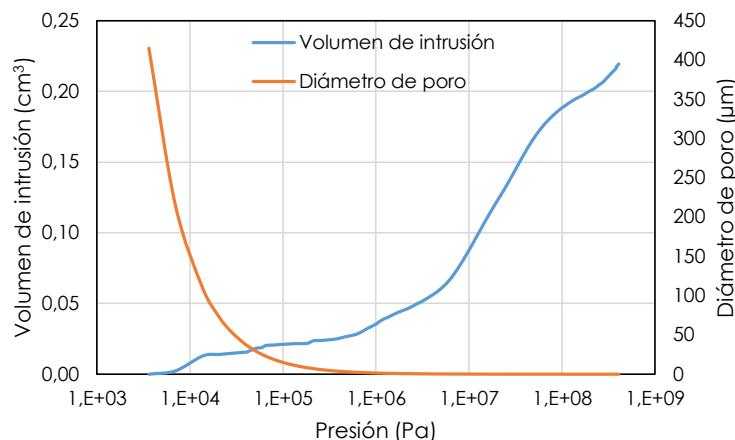
a)



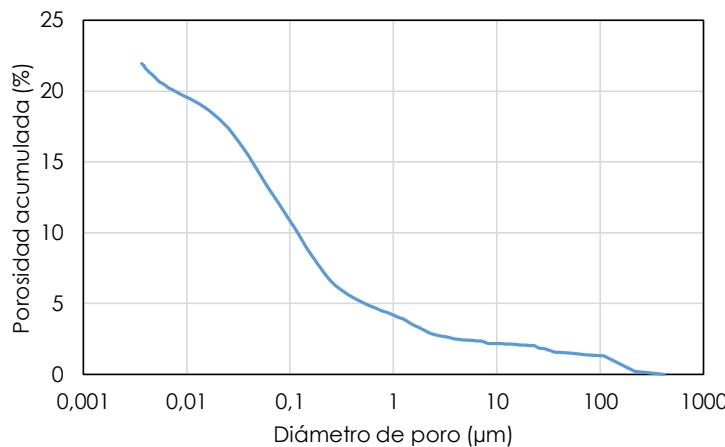
b)

**Figura AIII-69.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H39. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

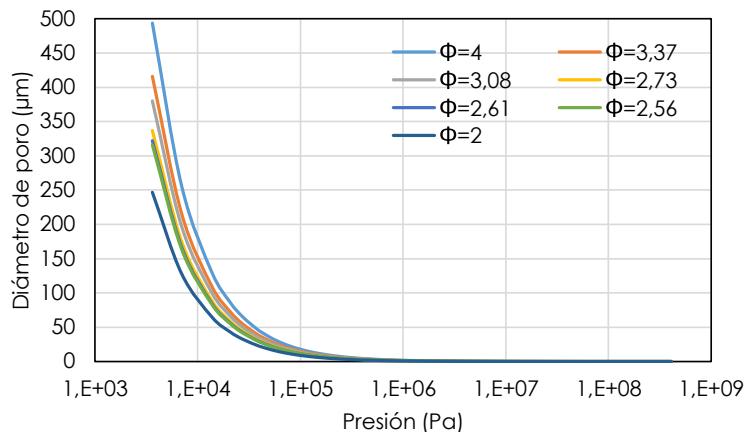


**Figura AIII-70.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H47. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

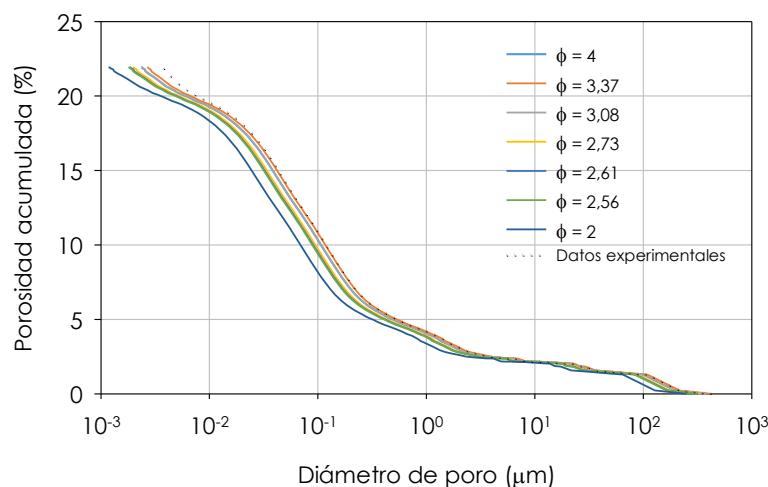


**Figura AIII-71.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H47. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04

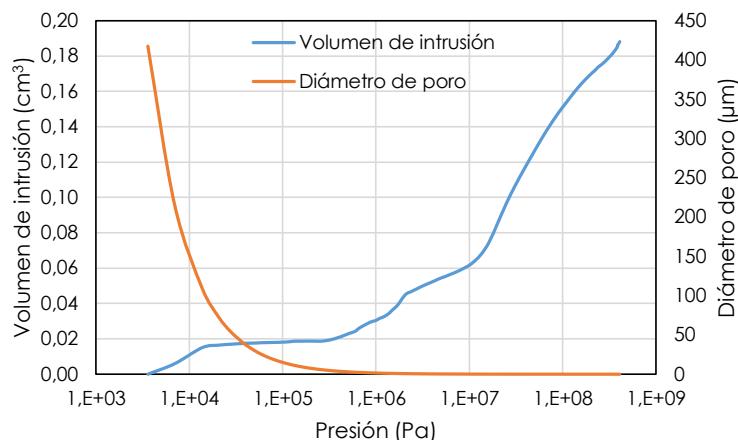


a)

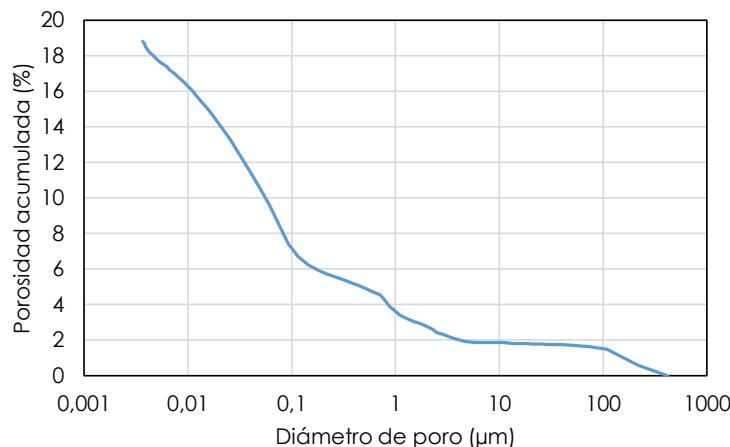


b)

**Figura AIII-72.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H47. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.

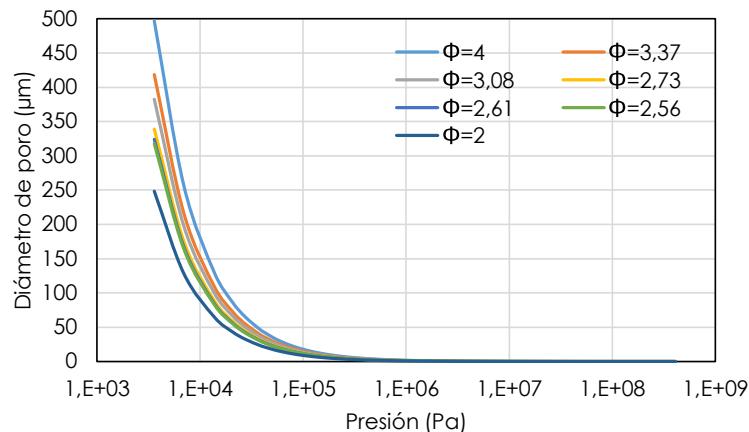


**Figura AIII-73.-** Variación del volumen de intrusión de mercurio y la variación del diámetro de poro en función de la presión aplicada para la muestra H51. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

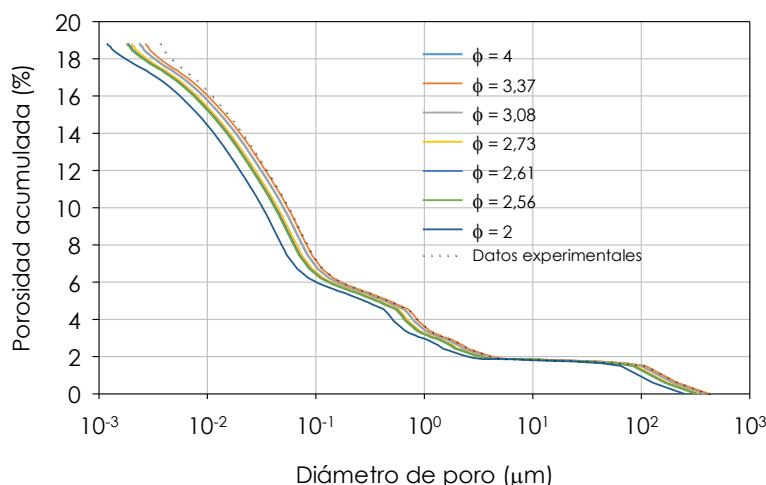


**Figura AIII-74.-** Variación de la porosidad acumulada en función del diámetro de poro para la muestra H51. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$  y  $\theta = 141^\circ$ .

Firmado por: NATALIA RODRIGUEZ BRITO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2017 19:16:00
RICARDO MANUEL SOUTO SUAREZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2017 19:40:53
JUAN JOSE SANTANA RODRIGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	09/06/2017 11:30:19
ERNESTO PEREDA DE PABLO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/06/2017 13:22:04



a)



b)

**Figura AIII-75.-** a) Efecto del tipo de factor de forma del poro en el diámetro de poro y b) en la porosidad acumulada (gráfica inferior), para la muestra H51. Datos obtenidos por MIP con  $\gamma = 0,481 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 141^\circ$  y  $\phi$  variable entre 2 y 4.