

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE  
LAS PALMAS.

MEJORA FÍSICA Y QUÍMICA DE MATERIALES  
CANARIOS AVANZADOS DE MATRIZ  
CEMENTICIA

NELSON FLORES MEDINA

DIRIGIDA POR  
DOCTOR JOSE MANUEL PEREZ LUZARDO  
CATEDRÁTICO FRANCISCO HERNANDEZ OLIVARES

**A MI FAMILIA, AMIGOS Y COMPAÑEROS DE VIAJE.  
EN ESPECIAL A TI DORIS.  
MUCHAS GRACIAS**

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar deseo agradecer a mi familia y amigos la culminación de esta tesis, sin su apoyo no hubiera sido posible finalizar con éxito este trabajo. En especial a mi esposa, Doris, que me ha ayudado en el desarrollo de los ensayos y apoyado hasta el final durante las distintas correcciones, fracasos y frustraciones, para superarlas y conseguir el fruto deseado. Sin ti no hubiera sido posible.

En segundo lugar a la Universidad Politécnica de Madrid, especialmente a la Escuela de Arquitectura, donde cursé los cursos de doctorado, con un equipo de profesores doctores de gran nivel que me han enseñado lo que se sin pedir nada a cambio. En especial a Francisco Hernández Olivares, profesor durante los cursos y director posteriormente de la tesis y a Gonzalo Barluenga Badiola por sus asesoría y apoyo en la redacción de la tesis. Al personal del laboratorio, José y Fabián, por su ayuda en el desarrollo de los ensayos y uso del material disponible.

En tercer lugar a las marcas comerciales que nos han facilitado el material de ensayo, Arican, para el trabajo con los áridos y GRACE Construction Products, por el suministro de superplastificantes, fibras y microsilíce y a Readymix Asland S.A., por el uso de sus laboratorios para la caracterización de los áridos canarios.

Finalmente a mis amigos y compañeros de viaje en Madrid, en especial a Gonzalo Melián Marrero, que me ha apoyado hasta el final y con quien comencé esta viaje que hoy hace un punto y seguido, para posteriormente difundir mediante artículos esta investigación. A mis amigos Tomás, Andrés, Alfonso y Héctor.

# ÍNDICE

<b>TÍTULO</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE FÓRMULAS</b>	<b>XXVIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Problemas e importancia de la durabilidad en los hormigones en Canarias. Resistencia física y química.</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivo de tesis.</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Plan de ensayos.</b>	<b>7</b>
<b>1.4. Organización de la tesis</b>	<b>9</b>
<b>2. Estado del arte.</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Introducción.</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Materiales cementicios canarios.</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1. Componentes tradicionales.</b>	<b>14</b>
2.2.1.1. El árido.	14
2.2.1.1.1. Tipos de rocas según sus características geológicas.	14
2.2.1.1.2. Obtención de los áridos.	15
2.2.1.1.3. Análisis de los áridos empleados en Canarias.	16
2.2.1.1.4. Coeficiente de forma. Importancia en la dosificación y puesta en obra del hormigón.	17
2.2.1.2. El cemento.	18
<b>2.2.2. Componentes de nueva investigación.</b>	<b>20</b>
2.2.2.1. Materiales puzolánicos.	21
2.2.2.1.1. Hormigones con puzolana natural.	23
2.2.2.1.2. Hormigones con Cenizas Volantes.	24
2.2.2.2. Colorantes.	26
<b>2.2.3. Normativa vigente.</b>	<b>26</b>

2.2.3.1. Instrucción de hormigón estructural (EHE).	27
2.2.3.1.1. Clasificación por ambientes.	27
2.2.3.1.2. Cantidad mínima y máxima de cemento.	29
2.2.3.1.3. Relación agua/cemento (a/c).	30
2.2.3.1.4. Valores máximos de abertura de fisura.	30
2.2.3.1.5. Impermeabilidad del hormigón.	33
2.2.3.1.6. Consideraciones adicionales sobre la durabilidad (Anejo 9°).	34
<b>2.2.4. Daños comunes en los hormigones canarios.</b>	<b>35</b>
<b>2.3. Materiales cementicios avanzados.</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1. Hormigones con fibras.</b>	<b>39</b>
2.3.1.1. Tipos de fibras.	40
2.3.1.2. Propiedades de las fibras de polipropileno.	42
2.3.1.3. Durabilidad de las fibras de polipropileno	45
2.3.1.3.1. Temperatura.	46
2.3.1.3.2. Radiación ultravioleta.	48
2.3.1.3.3. Acción química.	48
2.3.1.3.4. Fatiga.	49
2.3.1.4. Las fibras en el ambiente cementoso.	49
2.3.1.5. Propiedades plásticas del hormigón con fibras.	50
2.3.1.6. Investigaciones recientes.	53
<b>2.3.2. Hormigones con adiciones puzolánicas.</b>	<b>55</b>
2.3.2.1. Humo de sílice.	55
2.3.2.1.1. Características.	55
2.3.2.1.2. Propiedades.	57
2.3.2.1.3. Propiedades plásticas del hormigón con humo de sílice.	59
2.3.2.1.4. Investigaciones recientes.	59
2.3.2.2. Cenizas volantes.	61
2.3.2.2.1. Características.	61
2.3.2.2.2. Propiedades plásticas del hormigón con cenizas volantes.	63
2.3.2.2.3. Investigaciones recientes.	63
<b>2.3.3. Los reductores de agua en el hormigón.</b>	<b>64</b>
2.3.3.1. Los superplastificantes.	65
2.3.3.1.1. Características de los superplastificantes.	65

2.3.3.1.2. Tipos de superplastificantes.	65
2.3.3.1.3. Ventajas de los superplastificantes.	66
<b>2.4. Estudio de las propiedades de los materiales cementicios canarios.</b>	<b>67</b>
<b>2.4.1. Propiedades físicas</b>	<b>67</b>
2.4.1.1. Mecánicas (compresión, tracción, flexión).	67
2.4.1.1.1. Introducción.	67
2.4.1.1.2. Investigaciones recientes.	70
2.4.1.2. Resistencia a impacto.	73
2.4.1.2.1. Introducción.	73
2.4.1.2.2. Problemática en Canarias.	74
2.4.1.2.3. Investigaciones recientes.	74
2.4.1.3. Fisuración.	75
2.4.1.3.1. Introducción.	75
2.4.1.3.1.1. Tipos de fisuras.	76
2.4.1.3.1.1.1. Fisuras previas al endurecimiento del hormigón.	76
2.4.1.3.1.1.2. Fisuras posteriores al endurecimiento del hormigón.	76
2.4.1.3.1.2. Métodos de estimación de la fisuración.	77
2.4.1.3.1.3. Defectos constructivos.	79
2.4.1.3.2. Problemática en Canarias.	80
2.4.1.3.3. Investigaciones recientes.	80
2.4.1.4. Retracción.	83
2.4.1.4.1. Introducción.	83
2.4.1.4.2. Ensayos de determinación de los tipos de retracción.	86
2.4.1.4.3. Materiales de control de la retracción.	86
2.4.1.4.4. Problemática en Canarias.	87
2.4.1.4.5. Investigaciones recientes.	88
2.4.1.5. Compacidad/Permeabilidad.	92
2.4.1.5.1. Introducción.	92
2.4.1.5.2. Problemática en Canarias.	95
2.4.1.5.3. Investigaciones recientes.	98
<b>2.4.2. Propiedades Químicas.</b>	<b>102</b>
2.4.2.1. Carbonatación.	102
2.4.2.1.1. Introducción.	102
2.4.2.1.2. Fases de la Carbonatación.	103
2.4.2.1.3. Profundidad de Carbonatación.	103
2.4.2.1.4. Problemática en Canarias.	106

2.4.2.1.5. Investigaciones recientes.	108
<b>2.5. El proceso de corrosivo de barras de refuerzo de acero en hormigón armado.</b>	<b>110</b>
2.5.1. Introducción.	111
2.5.2. Descripción del proceso corrosivo.	114
2.5.3. Factores en el hormigón que influyen en el proceso corrosivo.	117
2.5.4. Tipos de corrosión.	118
2.5.5. Estudio del proceso corrosivo en hormigones.	120
<b>3. Mejoras en las propiedades de los materiales cementicios canarios.</b>	<b>124</b>
<b>3.1. Programa de ensayos.</b>	<b>124</b>
3.1.1. Características de los cementos empleados.	124
3.1.2. Características de los áridos empleados.	126
3.1.3. Dosificaciones.	133
3.1.3.1. Hormigón tipo.	134
3.1.3.2. Hormigón tipo con reducción de agua.	134
3.1.3.3. Hormigón con microfibras de polipropileno.	135
3.1.3.4. Hormigón con humo de sílice o microsílíce.	138
3.1.3.5. Hormigón con microfibras de polipropileno y humo de sílice.	139
3.1.4. Plan de ensayos.	142
<b>3.2. Mejora en las propiedades físicas.</b>	<b>144</b>
3.2.1. Mecánica de los hormigones avanzados canarios.	144
3.2.1.1. Consistencias de las distintas series.	144
3.2.1.2. Resistencia a compresión.	147
3.2.1.3. Resistencia a tracción.	153
3.2.1.4. Resistencia a flexión.	157
3.2.1.5. Resistencia a impacto.	162
3.2.1.6. Conclusiones.	168
3.2.2. La Fisuración en los hormigones avanzados canarios.	168
3.2.2.1. Ensayos desarrollados.	168

3.2.2.2. Área fisurada.	172
3.2.2.3. Longitud máxima de fisura.	181
3.2.2.4. Conclusiones.	185
<b>3.2.3. La retracción en los hormigones avanzados canarios.</b>	<b>185</b>
3.2.3.1. Ensayos desarrollados.	185
3.2.3.2. Variación en la relación a/c en hormigones sin adiciones.	188
3.2.3.3. Adición de microfibras de polipropileno.	189
3.2.3.4. Adición de humo de sílice o microsílíce.	191
3.2.3.5. Combinación de humo de sílice o microsílíce y fibras de cortas de polipropileno.	192
3.2.3.6. Retracción en condiciones de evaporación de agua de fraguado forzada por viento constante.	193
3.2.3.7. Variación en la relación A/C en hormigones con adiciones.	195
3.2.3.8. Conclusiones.	196
<b>3.2.4. La compacidad en los hormigones avanzados canarios.</b>	<b>197</b>
3.2.4.1. Ensayos desarrollados (densidad aparente, ultrasonidos, penetración de agua).	197
3.2.4.2. Densidad aparente en los hormigones avanzados canarios.	201
3.2.4.3. Microscopía en series de probetas.	204
3.2.4.4. Velocidad de propagación de ultrasonidos en los hormigones avanzados canarios.	214
3.2.4.5. Penetración de líquidos sometidos a presión en los hormigones avanzados canarios.	217
3.2.4.6. Conclusiones.	222
<b>3.3. Mejora en las propiedades químicas.</b>	<b>225</b>
<b>3.3.1. La carbonatación en los hormigones avanzados canarios.</b>	<b>225</b>
3.3.1.1. Ensayos desarrollados.	225
3.3.1.2. Valores máximo y mínimo de ancho de carbonatación.	228
3.3.1.3. Conclusiones.	230

<b>4. Conclusiones.</b>	<b>232</b>
<b>4.1. Relación entre las distintas propiedades ensayadas.</b>	<b>232</b>
4.1.1. Relación entre resistencias mecánicas y compacidad.	232
4.1.2. Relación entre fisuración y los parámetros estudiados.	238
4.1.3. Relación entre carbonatación y compacidad y permeabilidad de materiales.	241
<b>4.2. Conclusiones finales.</b>	<b>245</b>
4.2.1. Reducción de agua.	245
4.2.2. Fibra corta de polipropileno.	246
4.2.3. Humo de sílice	247
<b>4.3. Hormigones avanzados en ambientes agresivos químicamente.</b>	<b>248</b>
<b>4.4. Resistencias mecánicas de hormigones avanzados.</b>	<b>250</b>
<b>5. Aplicaciones de los materiales cementicios canarios avanzados y futuras investigaciones.</b>	<b>251</b>
<b>5.1. Ejemplos constructivos.</b>	<b>251</b>
<b>5.2. Futuras investigaciones.</b>	<b>252</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>253</b>

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Imagen aérea de Gran Canaria, la línea marca el borde de los asentamientos urbanos más importantes	3
Fig. 2.1. Imagen de zona costera del litoral de Gran Canaria, Playa del Hombre, Telde, donde se aprecia la entrada de vientos cargados de humedad y sal	36
Fig. 2.2. Gráfico de relación de la cantidad de cloruros y la distancia del mar en muestras obtenidas en distintos países (16)	37
Fig. 2.3. Vista de elemento a flexión de hormigón reforzado con fibra de polipropileno.	44
Fig. 2.4. Efecto de la temperatura en la variación del módulo elástico, y de la resistencia de rotura a tracción s. Francesca Ceroni (20)	46
Fig. 2.5. Fisuración de probetas cúbicas de pasta de cemento con porcentajes de fibras y relación A/C 0.5 después de exponerse a 650°C (21)	47
Fig.2.6. Gráfico de degradación de las resinas causadas por el álcalis. G1 fibras con resina termoplástica y G2 fibras con resinas de poliéster (17)	50
Fig. 2.7. Vista de ensayo en laboratorio de descenso de cono de Abrams de hormigón con fibra para el estudio de la consistencia de las distintas series	52
Fig. 2.8. Vista de ensayo realizado en laboratorio de medida de consistencia mediante consistómetro Vebe en hormigón con fibra	52
Fig. 2.9. Imagen de masa de hormigón fresco con microfibras	53
Fig.2.10. Imagen microscópica de cemento hidratado con y sin humo de sílice empleado en este trabajo	58
Fig.2.11. Gráfica de variación de la resistencia a tracción del hormigón en relación con la fracción de áridos fisurados	60
Fig 2.12. Limitaciones de las armaduras en piezas sometidas a compresión simple o compuesta	67
Fig. 2.13. Variación de la relación tracción/compresión en relación con el valor de compresión del material (34)	70
Fig. 2.14. Esquema de rotura de fisura y curva de aproximación según G. Guinea	71
Fig. 2.15. Gráfica esquemática de rotura de material tenáz	72

Fig. 2.16. Gráficas de resultados obtenidos por N. Banthia de materiales a flexión. En la gráfica superior podemos ver como después de una primera rotura el material continúa trabajando. En la segunda se estudia la flecha en milímetros del material después del pico de rotura máximo (27)	72
Fig. 2.17. Comprobación de límite de fisuración por solicitaciones a compresión en piezas de hormigón armado	77
Fig. 2.18. Comprobación de límite de fisuración por solicitaciones a tracción en piezas de hormigón armado	78
Fig. 2.19. Fórmula ACI 209 donde $t$ es la edad del hormigón a la que se quiere predecir la retracción del hormigón, $t_c$ es la edad de comienzo del curado del hormigón, y $E_{sh}$ es la retracción última (36)	79
Fig.2.20. Imagen esquemática de rotura de pieza de hormigón en la zona sin refuerzo (A) y con refuerzo (B) en espécimen de M. Sule. En la zona cercanas a las barras las fisuras son de menor tamaño que las de la zona sin armado. La formación de estas pequeñas fisuras aumentan la capacidad resistente del hormigón, antes de la aparición de la fisura transversal de la foto de la derecha (38)	81
Fig.2.21. Gráficas obtenidas de los estudios realizados por H.Y. Qasrawi estudia como con el porcentaje de estrés al que se someta la pieza se produce una bajada de la velocidad relativa a ultrasonidos del hormigón. En la segunda como el ancho de fisura influye en la velocidad de ultrasonidos (39)	82
Fig.2.22. Esquema que representa la retracción autógena (s. JCI 2002)	84
Fig.2.23. Gráfico de cambio volumétrico relativo en función de la hidratación (42)	90
Fig. 2.24. Gráfico de relación entre radio capilar activo y energía disipada en función del descenso de la hidratación.(42)	91
Fig.2.25. Diagrama esquemático de la estructura porosa del hormigón.	93
Fig. 2.26. Imagen de la representación esquemática de un sistema boporoso (44)	95
Fig. 2.27. Imagen obtenida mediante microscopio óptico de 200 x de áridos en hormigón con problemas de segregación y falta de lechada en el borde de un poro	96
Fig. 2.28. Imagen obtenida mediante microscopio óptico de 200 x de bordes de áridos y poro generado por la propia geometría de éste	97

Fig.2.29. Imagen esquemática del volumen calculado mediante modelos basados en la termodinámica de hidratos en cemento Pórtland en función de la temperatura suponiendo una disolución igual en las fases de clinker	99
Fig.2.30. Gráficos de cálculo de la porosidad total y capilar en relación con la resistencia de morteros	100
Fig. 2.31. Modelo de la triple esfera en que se basa el programa informático BetonlabPro2. (49)	101
Fig. 2.32. Gráficas de cálculo de la profundidad de carbonatación según un tiempo determinado en probetas con cemento con y sin adiciones en distintas cuantías mediante proceso de carbonatación acelerado (52)	107
Fig. 2.33. Gráficas de estudio entre la relación A/C y la cantidad de CO <sub>2</sub> en el desarrollo de la profundidad de la pieza, comparando según sea una pieza expuesta o protegida de la lluvia	108
Fig.2.34. Gráficas que demuestran un estado óptimo para la relación agua cemento de 0.5 e incluso 0.6 en hormigones expuestos	109
Fig. 2.35. Esquema de procesos de humectación y desecación en el ámbito de la fisura	116
Fig. 2.36. Vista esquemática de los tipos de corrosión	119
Fig.2.37. Gráfico de medidas del potencial corrosivo en distintas localizaciones de las vigas empleando el pulsímetro galvánico	121
Fig. 2.38. Gráfica de deposición de clorhídros a lo largo de un año en estaciones de medida a distintas distancias del mar	122
Fig.2.39. Gráfica de contenido total de cloruros en la zona de la barra de las muestras (16 mm) en las zonas corroídas a compresión o a tracción de las vigas corroídas en el tiempo	123
Fig. 3.1. Vista del cono de Abrams y de la medida del descenso	144
Fig. 3.2. Imagen del consistómetro Vebe con probeta para su ensayo posterior	145
Fig. 3.3. Imagen de ensayo de rotura de probeta cilíndrica de medidas 15x30 cm. a compresión	148
Fig 3.4. Gráfica de resistencia a compresión de las distintas series pasados 7 y 28 días	149

Fig. 3.5. Gráfica de relación de resistencias a compresión y porcentaje de fibras de las distintas series pasados 28 días	150
Fig.3.6. Gráfica de relación de resistencias a compresión y porcentaje de Humo de Sílice en las distintas series según porcentaje de fibras con relación a/a constante de 0,609	150
Fig.3.7. Gráfica de relación de resistencias a compresión y relación a/c de las distintas series de hormigón avanzado	151
Fig.3.8. Imagen de probetas con microfibras ensayadas a compresión.	152
Fig.3.9. Rotura de probeta cilíndrica de medidas 15x30 cm. dispuesta en horizontal mediante método brasileño en prensa hidráulica	153
Fig.3.10. Gráfica de resistencias a tracción indirecta de las distintas series pasados 7 y 28 días	155
Fig.3.11. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según la relación a/c de las distintas series ensayadas	155
Fig. 3.12. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según los porcentajes de fibra	156
Fig. 3.13. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según los porcentajes de Humo de sílice en series con y sin fibra corta de polipropileno	156
Figura 3.14. Imagen de rotura de pieza prismática de hormigón tipo de 15x15x45 cm <sup>3</sup> . doblemente apoyada con sensor de desplazamiento	158
Fig. 3.15. Gráfica de resistencias a flexión de las distintas series de hormigón tipo pasados 7 y 28 días	159
Fig. 3.16 Gráfica resistencia a flexión-flecha en probetas sometidas a flexión de las distintas series de hormigón tipo 28 días obtenidas con probetas de 15x15x45 cm <sup>3</sup>	159
Figura 3.17. Gráfica de resistencia a flexión-flecha en probetas sometidas a flexión de las distintas series de hormigón avanzado pasados 24 meses	161
Figura 3.18. Gráfica de relación entre resistencia máxima a flexión y porcentaje de fibra en series con y sin humo de sílice	161
Figura 3.19. Gráfica de relación entre resistencia máxima a flexión y relación a/c en series de probetas prismáticas 4x5x16 cm <sup>3</sup> obtenidas mediante corte de losas	162
Fig.3.20. Imagen de plataforma de ensayo para resistencia a impactos de losas de hormigón	163

Fig. 3.21. Imagen de probeta fracturada después de ser ensayada a impacto y de esfera de peso 1 Kg	163
Fig.3.22. Gráfica de relación entre número de impactos en el momento de fisuración (1) y rotura total (2) de la losa de hormigón de las distintas series	164
Fig.3.23. Imagen de la superficie de la probeta de la serie H.S.2-600 ensayada a impacto. En la esta probeta se observó la capacidad de la superficie a deformarse con el impacto antes de fisurar y posteriormente romper	165
Figura 3.24. Gráfica de relación entre energía resistida para la rotura y para la fisuración inicial y la cantidad de fibras por volumen de hormigón	165
Fig.3.25. Gráfica de relación entre energía resistida a impactos para la rotura según el porcentaje Humo de Sílice añadido a la dosificación	166
Fig.3.26. Gráfica de relación entre energía resistida a impactos y la relación a/c en probetas con igual cantidad de fibras y humo de sílice	167
Fig.3.27. Imagen del molde para la realización de la losa Kraai. Se pueden apreciar las piezas de anclaje en U	169
Fig.3.28. Vista de losa Kraai y de bandeja de retracción, con ventilador durante ensayo efectuado en losa con dosificación de 0,900 kg/m <sup>3</sup> y 10 % microsílíce sobre peso de cemento, relación a/c 0,55 (H.S.F.2-900)	170
Fig.3.29. Losa Kraai hormigón tipo. Vista general de la losa dividida por sectores y marcado de las fisuras	171
Fig.3.30. Imagen de losa Kraai hormigón tipo. Vista general de la losa dividida por sectores y re-marcado de las fisuras pasados 24 meses	171
Fig.3.31. Gráfica de relación entre el área fisurada con la cantidad de fibra añadida al hormigón con y sin humo de sílice o microsílíce	173
Fig.3.32. Gráfica de relación entre la cantidad de fisuras con la cantidad de fibra añadida al hormigón con y sin humo de sílice o microsílíce	174
Fig.3.33. Imagen general de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón tipo con adición de microsílíce en un 10% de sustitución de cemento (H.S.1)	175
Fig.3.34. Imagen parcial de uno de los sectores de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón tipo con adición de microsílíce en un 10% de sustitución de cemento (H.S.1)	175
Fig.3.35. Imagen general de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón con adición de microsílíce y fibra corta de polipropileno, relación A/C=0,40 (H.S.F.3-600), en la que no se aprecian fisuras	176

Fig.3.36. Gráfica de relación entre el área fisurada con la cantidad de humo de sílice adicionado con series de distintas proporciones de microfibras añadidas al hormigón	176
Fig. 3.37. Gráfica de relación entre el área fisurada con la relación Agua/Cemento con cantidades constantes de microfibras de un 0,066%	177
Fig.3.38. Gráfica de relación entre el área fisurada y la cantidad de fisuras en hormigones con y sin fibras	178
Fig.3.39. Imagen de probeta de hormigón con adición de microfibras de polipropileno en porcentaje 0,033% después de realizarle el remarcado	179
Fig. 3.40. Gráfica de relación entre la longitud máxima de fisura y la cantidad de microfibras manteniendo constante la relación a/c en 0,609 con y sin adición de humo de sílice	182
Fig. 3.41. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y la cantidad de microfibras manteniendo constante la relación a/c en 0,609 tanto con como sin microsílíce	182
Fig.3.42. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y la cantidad de humo de sílice manteniendo constante la relación a/c en 0,609 en las distintas series con adiciones de microfibras de polipropileno	183
Fig. 3.43. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y relación a/c en hormigones con microsílíce y 0,066% de adición de fibra corta de polipropileno	184
Fig. 3.44. Gráfica de relación entre la longitud máxima de fisura y la longitud total fisurada	184
Fig.3.45. Esquema de la base para el ensayo de retracción en los hormigones avanzados canarios	186
Fig. 3.46. Vista de instrumental de ensayo de medida de retracción. Se puede observar la bandeja de soporte, el medidor y el receptor de datos	187
Fig. 3.47. Vista de instrumental de ensayo de medida de retracción. Imagen cercana del medidor	187
Fig. 3.48. Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la relación Agua/Cemento en las series en el tiempo	188
Fig.3.49. Gráfica de relación entre la retracción y tiempo en las distintas series con variaciones de la cantidad de fibra adicionada al hormigón	189
Fig.3.50 Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la cantidad de fibra adicionada al hormigón en el factor tiempo en relaciones a/c fijas de 0,55	190

Fig.3.51. Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la relación a/c en hormigones avanzados con fibras cortas de polipropileno constantes en el tiempo	191
Fig.3.52. Gráfica de relación entre la retracción y la adición de humo de sílice en los hormigones canarios en el tiempo	191
Fig.3.53. Gráfica de relación entre la retracción y la adición de humo de sílice, microfibras de polipropileno y reducción en la relación A/C en los hormigones canarios en función del tiempo	192
Fig. 3.54. Gráfica de relación entre la retracción en función del tiempo en series que varían la velocidad del viento	193
Fig. 3.55. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y la cantidad de microfibra de polipropileno adicionado a los hormigones con relaciones de a/c 0,609 y 0,55	195
Fig. 3.56. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y influencia de la relación a/c en las distintas series de hormigones con fibras	195
Fig. 3.57. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y la cantidad de Humo de Sílice o microsíllice adicionado a los hormigones avanzados con las diferentes cantidades de microfibra en su interior	196
Fig.3.58. Imagen de equipo de medida de ultrasonidos usado en probeta prismática	198
Fig. 3.59. Imagen de máquina de ensayos para penetración de agua de PAS (Pavimentos Asfálticos Salamanca), vista de compresor y mesa de ensayos con cánulas de fijación	199
Fig. 3.60 Imagen de máquina de ensayos para penetración de agua de PAS (Pavimentos Asfálticos Salamanca), vista cercana de cánulas de fijación para probetas cilíndricas de 15x30 cm <sup>2</sup>	199
Fig. 3.61. Imagen de resumen de los parámetros a obtener en ensayo de penetración de agua a presión. La zona rayada es el área total de penetración	200
Fig. 3.62. Gráfica de relación entre la densidad y la cantidad de fibras en el hormigón con relación de a/c constantes 0,609	201
Fig. 3.63. Gráfica de relación entre la densidad y la relación a/c en los distintos hormigones con fibras en los que se ha pasado de una relación 0,609 a una relación 0,55.	202

Fig. 3.63 Gráfica de relación entre la densidad y la adición de microsílíce o humo de sílice en los distintos hormigones con fibras en los que se ha pasado de una relación 0,609 a una relación 0,55 de a/c	202
Fig.3.64. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo (HT1), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma	204
Fig. 3.65. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo (HT1), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma	205
Fig.3.66. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. (HT1-600), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma	205
Fig. 3.67. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. (HT1-600) en la que se observa la fibra en la cara de dos poros	206
Fig. 3.68. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. (HT1-900)	207
Fig.3.69. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. (HT1-900)	208
Fig.3.70. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. Y 10% H.S. con relación a/c 0,5 (H.S.F.2-600), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma	208
Fig. 3.71. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600)	209
Fig.3.72. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600)	209
Fig.3.73. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600)	210
Fig. 3.74. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600)	210
Fig. 3.75. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. Y 10% H.S. con relación A/C 0,6 (H.S.F.1-900)	211
Fig. 3.76. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900)	212

Fig. 3.77. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900)	212
Fig. 3.78. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900)	213
Fig.3.79.Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la cantidad de microfibra adicionada al hormigón	214
Fig. 3.80. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la relación a/c	215
Fig.3.81. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la cantidad adicionada de humo de Sílice o microsílíce	215
Fig. 3.82. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con fallo de penetración lateral en la serie H.F.2-900	218
Fig. 3.83. Gráfica de relación entre la penetración del frente tanto máxima como media y la cantidad de microfibras adicionadas	218
Fig. 3.84. Gráfica de relación entre la penetración del frente máximo y la cantidad de relación de a/c	219
Fig. 3.85. Gráfica de relación entre la penetración del frente medio y la cantidad de relación de a/c	219
Fig. 3.86. Gráfica de relación entre la penetración del frente máximo y medio con la cantidad de humo de sílice o microsílíce adicionado	220
Fig. 3.87. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con frente de penetración en forma triangular	221
Fig. 3.88. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con frente de penetración horizontal	221
Figura 3.89. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos (Es) y la densidad aparente de las distintas probetas	223
Fig. 3.90. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos (Es) y la penetración máxima y media en probetas ensayadas con agua a presión	224
Fig. 3.91 Gráfica de relación entre los frentes de penetración de agua a presión y las densidades aparentes de las distintas series de hormigón avanzado	224
Fig. 3.92. Imagen de indicador de pH y etileno con probeta fragmentada a ensayo brasileño y posteriormente rociada con disolución de fenoftaleina	226
Fig. 3.93. Imagen de probeta ensayada a brasileño y rociada con spray indicador de Ph a base de fenoftaleina	226

Fig. 3.94. Imagen de losa fragmentada a impacto, rociada con spray indicador de Ph a base de fenoftaleina. Medición de ancho de carbonatación	227
Fig. 3.95. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima con la cantidad de fibra añadida al hormigón	229
Fig. 3.96. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima con la relación a/c	229
Fig.3.97. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima en series con y sin humo de sílice con cantidades de agua y fibra iguales	230
Fig. 4.01. Gráfica de relación entre las resistencias a compresión y la densidad de las distintas series con distintas adiciones	232
Fig. 4.02. Gráfica de relación entre las resistencias a compresión y el módulo de ultrasonidos Es	233
Fig. 4.03. Gráfica de relación entre la resistencia a tracción obtenidas mediante ensayo a brasileño y la densidad de las distintas series con distintas adiciones	233
Fig. 4.04. Gráfica de relación entre las resistencias a tracción obtenidas mediante ensayo a brasileño y el módulo de ultrasonidos (Es)	234
Fig. 4.05. Gráfica de relación entre la resistencia a flexión obtenida mediante ensayo de probetas prismáticas biarticuladas y la densidad de las distintas series con distintas adiciones	234
Fig. 4.06. Gráfica de relación entre la resistencia a flexión obtenida mediante ensayo en probeta prismática biarticulada con carga única centrada y el módulo de ultrasonidos (Es)	235
Fig. 4.07. Gráfica de relación entre la densidad aparente y el módulo de ultrasonidos en distintas series de hormigones avanzados	235
Fig. 4.08. Gráfica de relación entre densidad aparente y resistencia a impactos resistidos por las distintas series de hormigón avanzado	236
Fig. 4.09. Gráfica de relación entre módulo ultrasonidos y resistencia a impactos.	236
Fig. 4.10. Gráfica de relación entre retracción y área fisurada en los distintos tipos de hormigón avanzado	238
Fig.4.11. Gráfica de relación entre profundidad de carbonatación y el área fisurada en las distintas series de hormigón avanzado	238

Fig. 4.12. Gráfica de relación entre área fisurada y el área encerrada en los ensayos de penetración de agua a presión	239
Fig. 4.13 Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y resistencias a compresión	241
Fig. 4.14. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y resistencias a compresión	241
Fig. 4.15. Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y la densidad aparente	242
Fig. 4.16. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y la densidad aparente de las distintas series de hormigón avanzado	242
Fig. 4.17. Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y módulo de ultrasonidos de las distintas series de hormigón avanzado	243
Fig. 4.18. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y el módulo de ultrasonidos de las distintas series de hormigón avanzado	243

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla de ensayos físicos	7
Tabla 1.2 Tabla de ensayos mecánicos	8
Tabla 1.3. Tabla de ensayos químicos	8
Tabla 2.1. Composición química porcentual en peso de los áridos de tipo monolítico de la cantera de Aricán (5)	15
Tabla 2.2. Comparación de valores de módulo granulométrico de los áridos fonolíticos y basálticos de la Escuela de Arquitectura de Las Palmas y los empleados en este trabajo	16
Tabla 2.3. Valores de coeficientes de forma de los áridos de procedencia fonolítica y basáltica (5)	18
Tabla 2.4. Valores máximos porcentuales de adición de puzolana natural en los cementos según RC-08	19
Tabla 2.5. (8.2.2. EHE-08.) Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras (1)	28
Tabla 2.6. (37.3.2.a. EHE-08) Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento	29
Tabla 2.7. (37.3.2.a. EHE). Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento	30
Tabla 2.8. Valores máximos de abertura de fisuras según ambiente. (5.1.1.2 EHE-08 (1))	32
Tabla 2.9. Valores máximos y medios para la profundidad de penetración de agua bajo presión. (37.3.3 EHE-08 (1))	33
Tabla 2.10. Propiedades físicas de las fibras comerciales más usuales. La tenacidad medida en gigapascales como relación entre la deformación y la tensión que es capaz de resistir la fibra. En el gráfico tensión-deformación corresponde al área encerrada por la curva dibujada en su trabajo hasta la rotura	41
Tabla 2.11. Propiedades de poliofinas comerciales y otros polímeros utilizados para fabricar fibras. (i significa isotáctico). Siendo Tg la temperatura de transición vítrea y Tm la temperatura de cristalización a la cual cristaliza/funden los cristales de la región cristalina del polímero	43

Tabla 2.12. Propiedades de fibra corta de polipropileno del modelo comercial Grace Microfiber, empleada en este trabajo (18)	45
Tabla 2.13. Características del microsílíce Grace Force 10,000 D	56
Tabla 2.14. Análisis Químico del microsílíce en comparación con cemento Pórtland común con el microsílíce Grace Force 10,000 D	57
Tabla 2.15. Análisis químico de las cenizas volantes de la marca comercial Grace “Grace fly ash” en comparación con cemento Pórtland común	62
Tabla 3.1 .Características cemento puzolánico “Jaguar”, suministrado por Cementos especiales de las Islas “CEISA”	125
Tabla 3.2 .Características cemento Pórtland con puzolana “Atlante especial”, suministrado por Cementos especiales de las Islas “CEISA”	125
Tabla 3.3. Resultados de Ensayos de Granulometría de la Arena del Sahara (0/1)	126
Tabla 3.4. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas de la Arena del Sahara (0/1)	127
Tabla 3.5. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas de la Arena del Sahara (0/1)	127
Tabla 3.6.Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 0/5mm. (Arena)	128
Tabla 3.7.Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 0/5mm. (Arena)	129
Tabla 3.8. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 0/5mm. (Arena)	129
Tabla 3.9.Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 5/10mm	130
Tabla 3.10.Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 5/10mm	130
Tabla 3.11. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 5/10mm	131
Tabla 3.12. Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 10/20mm	131
Tabla 3.13. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 10/20mm	132

Tabla 3.14. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 10/20mm	132
Tabla 3.15. Dosificación de hormigón tipo	134
Tabla 3.16. Dosificación de hormigón relación a/c 0.5	134
Tabla 3.17. Dosificación de hormigón tipo con 0.300 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6	135
Tabla 3.18. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6.	135
Tabla 3.19. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55	136
Tabla 3.20. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6	136
Tabla 3.21. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55	137
Tabla 3.22. Dosificación de hormigón tipo con 1.200 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6	137
Tabla 3.23. Dosificación de hormigón tipo con 1.200 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55	138
Tabla 3.24. Dosificación de hormigón tipo con 10 % de Humo de Sílice a/c 0.6	138
Tabla 3.26. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.60	139
Tabla 3.25. Dosificación de hormigón tipo con 10 % de Humo de Sílice a/c 0.55	139
Tabla 3.27. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.50	140
Tabla 3.28. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.50	140
Tabla 3.29. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.60	141
Tabla 3.30. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m <sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.55	141
Tabla 3.31. Plan de ensayos físicos	142
Tabla 3.32. Tabla de ensayos mecánicos	143

Tabla 3.33. Tabla de ensayos químicos	143
Tabla 3.34. Resultados Ensayo del Cono de Abrams Hormigón de Control	145
Tabla 3.35. Resultados Ensayo del Cono Vebe en Hormigones mejorados	146
Tabla 3.36. Valores de conversión entre probetas sometidas a compresión	147
Tabla 3.37 Resultados Ensayo mecánico a compresión de probetas de series de hormigón tipo con relación de a/c 0.60 (H.T.2)	148
Tabla 3.38. Resultados Ensayo mecánico a compresión de probetas de series de hormigón avanzados	149
Tabla 3.39 Resultados ensayo mecánico a tracción mediante método brasileño de probetas cilíndricas de hormigón tipo con relación de A/C 0.60 (H.T.2)	154
Tabla 3.40. Resultados ensayo mecánico a tracción mediante método brasileño de probetas cilíndricas de hormigones avanzados	154
Tabla 3.41. Resultados de rotura por carga estática a flexión de hormigón tipo	158
Tabla 3.42. Valores de resistencia máxima flexión y módulo elástico de probetas sometidas a flexión con carga en un punto y doblemente apoyadas en probetas pasados 24 meses	160
Tabla 3.43. Resultados de rotura por impacto de un Kg. desde una altura de 1.65 m. Se han tomado valores de rotura superficial y de rotura total de las distintas probetas.	164
Tabla 3.44. Tabla resumen de resultados de medición de área total fisurada y cantidad de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras.	172
Tabla 3.45. Tabla resumen de resultados de medición pasados dos años de área total fisurada y cantidad de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras	180
Tabla 3.46. Tabla resumen de resultados de medición de longitud máxima de fisura y longitud total de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras	181
Tabla 3.47. Tabla resumen de valores máximos de retracción de hormigones avanzados con y sin viento	194

Tabla 3.48. Tabla resumen de valores de densidad en las distintas series de hormigones avanzados canarios	201
Tabla 3.49. Tabla resumen de resultados de velocidad de propagación de onda y módulo de ultrasonidos en las distintas series de hormigones avanzados canarios	214
Tabla 3.50. Tabla resumen de resultados de penetración máxima, media y valores de área encerrada dentro del frente de penetración en las distintas series de hormigones avanzados canarios	217
Tabla 3.51. Tabla resumen de resultados de penetración máxima en serie H.F.2-900 con defectos en las probetas	217
Tabla 3.52. Tabla resumen de los distintos parámetros para indicar la compacidad y permeabilidad de los hormigones avanzados	223
Tabla 3.53. Tabla resumen de resultados de penetración máxima y mínima de carbonatación en hormigones mejorados canarios	228

## LISTA DE FÓRMULAS

For. 2.1. Fórmula de cálculo de fisura característica en hormigones según EHE-08 (1)	31
For. 2.2. Fórmula de cálculo del estado límite de durabilidad. (Anejo 9 EHE-08 (1)).	34
For. 2.3. Limitaciones en piezas con dos armaduras principales sometidas a tracción simple o compuesta. (1)	68
For. 2.4. Limitación a la armadura longitudinal traccionada en secciones a flexión simple o compuesta (1)	69
For.2.5. Fórmula de cálculo de la retracción en hormigones. (38)	86
For.2.6. Fórmula de cálculo de la retracción por secado	88
For.2.7. Fórmula de cálculo de la presión capilar	89
For. 2.8. Fórmula de cálculo del coeficiente de permeabilidad intrínseco en un material poroso. (44)	94
For.2.9. Fórmula de la segunda Ley de Fick (52)	103
For. 2.10. Primera Ley de Fick. Fórmula de cálculo de la profundidad de carbonatación en función del tiempo (52)	104
For. 2.11. Expresión para el cálculo de tiempo necesario para que se produzca carbonatación a una distancia de de la superficie del hormigón. (1)	106
For.2.12. Expresión para el cálculo del coeficiente de carbonatación. (1)	106
For.2.13. Fórmula de cálculo de la altura capilar según la ley de Jurin.	111
For.2.14. Formula del coeficiente de permeabilidad intrínseco	113
For.2.15. Formula para el cálculo del tiempo de propagación. (1)	114
For.2.16. Fórmula de reacción catódica en el proceso de oxidación del acero	115
For.3.1. Fórmula de cálculo de la tensión horizontal a tracción, resistencia a tracción indirecta (1)	153

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PROBLEMAS E IMPORTANCIA DE LA DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES EN CANARIAS. RESISTENCIA FÍSICA Y QUÍMICA:

La durabilidad de los hormigones es un factor que ha tomado una importancia creciente en los últimos años, que depende de unos condicionantes iniciales de calidad del material. Como veremos un hormigón con calidad tanto en el proceso de fabricación, como en los materiales empleados, y en el correcto tratamiento en obra, será un hormigón con buenas características en lo que a durabilidad se refiere.

La importancia de la durabilidad en los hormigones se debe a que la vida útil exigida a los edificios hoy día es mayor que anteriormente, además se le exigen unas condiciones físico-estéticas adecuadas.

La conciencia ecológica y económica en los edificios es considerable. No es tan fácil pensar en un edificio de corta vida cuando en este los propietarios finales son muchos y han empleado grandes cantidades de dinero en la que suele ser la mayor inversión en la vida de una persona. Además las propiedades suelen pertenecer a una comunidad de propietarios que no adquieren conciencia del mantenimiento al que se debe someter un edificio y de las inspecciones que debe tener para una seguridad del mismo.

Lógicamente este mantenimiento puede ser costado en un principio de manera económica, pues los primeros problemas suelen ser de acabado y de instalaciones incorrectas u obsoletas, pero al cabo de los siguientes años los costes de mantenimiento pueden crecer si estos afectan a la resistencia del hormigón. Llegado a un punto de exceso coste de mantenimiento se puede concluir en que la vida útil del edificio ha

acabado al ser más rentable la nueva construcción de otro edificio. La mejora de los hormigones en las etapas iniciales y las adecuaciones constructivas con un aumento del coste inicial favorecen un ahorro final al no necesitar tanto mantenimiento y una mayor vida de las edificaciones.

El estudio de los hormigones en esta tesis se plantea desde la peculiaridad del entorno geográfico canario y de los materiales que en las islas se suelen emplear, buscando una mejora de las características del material base con materiales de nueva generación o nuevo empleo, tales como las fibras cortas de polipropileno, humo de sílice y de los reductores de agua.

El desarrollo del control de las características del hormigón busca una mejora de las propiedades físicas, mecánicas y químicas, con el fin de aumentar la previsión de vida del hormigón final.

El problema de la durabilidad en Canarias se debe a la cercanía con la costa y el ambiente marino que se origina en estas zonas, podemos concretar que aproximadamente el 70% de las edificaciones se sitúan en estas zonas, entendiendo por costeras aquellas situadas a menos de cinco kilómetros de la borde marino. La definición de costera viene establecido en la normativa de aplicación en el control de la puesta en obra de los hormigones la EHE (1), para marcar de esta manera una diferenciación del ambiente y de los elementos agresivos a los que se expone el hormigón.



*Fig. 1.1. Imagen aérea de Gran Canaria, la línea marca el borde de los asentamientos urbanos más importantes.*

Los aspectos estudiados miran de cerca por tanto el proceso de ataque por cloruros en ambiente aéreo y como afecta a los hormigones armados. El ataque por cloruros se centra en la corrosión del acero embebido en la masa de hormigón, atendiendo en este trabajo al papel protector del hormigón del acero desde el ambiente que rodea la pieza. El conocimiento de este proceso nos ayuda a discernir los problemas del hormigón en estos ambientes. Se trata éste de un proceso muy estudiado y que se recoge en este trabajo a modo justificativo de los temas planteados.

Se ha estudiado las propiedades físicas de estos hormigones avanzados mediante ensayos que han determinado las resistencias mecánicas, el comportamiento en la retracción a la que se han visto sometidas las distintas series, la permeabilidad de las diferentes muestras endurecidas y la compacidad de las mismas. Estos conceptos posteriormente se han relacionado entre sí marcando pautas de comportamiento en las distintas dosificaciones.

Las propiedades químicas de los hormigones marcan la futura durabilidad del material, es por ello que se ha estudiado el proceso de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, ensayando posteriormente la carbonatación y la alcalinidad de los hormigones en las distintas dosificaciones.

## **1.2. OBJETIVO DE LA TESIS:**

El objetivo principal de la tesis es comprender mejor el comportamiento del hormigón especialmente en su estado inicial, en el que se produce el fraguado y endurecimiento del mismo, durante las primeras horas, estudiando los aspectos que realmente influyen en su estabilidad y durabilidad final. Será en este proceso de cambio de material plástico a sólido aquel en el que se pueden considerar más delicadas las condiciones que requiere el hormigón para una resistencia final química y mecánica.

En segundo lugar estudiar las propiedades que materiales como las fibras cortas de polipropileno y las pequeñas partículas de humo de sílice, de poca investigación en los hormigones canarios y aditivos, tales como los plastificantes y superplastificantes pueden aportar a este campo de la arquitectura con hormigones, incluso para poder extrapolarlos a lugares donde las características de los áridos o de los cementos puedan asemejarse a los canarios. Estudiando el efecto de las distintas fracciones volumétricas y dosificaciones en la mejora de las propiedades en el proceso constructivo y de vertido del hormigón así como en el estado endurecido a los siete y veintiocho días.

En tercer lugar ver la influencia que pueden aportar los materiales que se van a añadir al hormigón no sólo de forma separada, sino ver si pueden poseer un efecto sinérgico, de mejora de la propiedad inicial en el uso conjunto de los mismos con otros materiales. De manera que podemos ver como se puede conseguir la optimización en el empleo de determinados aditivos o adiciones en dosificaciones que los interrelacionen entre sí.

Este trabajo se cierra con un estudio del material a los dos años edad, con el fin de ver la influencia del tiempo en estos materiales. Este paso del tiempo es esencial en el estudio de hormigones a ambiente externo, especialmente en el desarrollo de la carbonatación y en la influencia de los rayos ultravioletas en la vida de las fibras de polipropileno. Este ambiente externo en el que se han dejado las probetas es el del exterior del laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, para establecer unas pautas de comportamiento de los distintos procesos químicos en el hormigón, pues lo que se busca es establecer valores de mejora reales de permeabilidad en distintas dosificaciones de los hormigones canarios con adiciones y aditivos.

Posteriormente y en base a estas mejoras estudiar las posibilidades constructivas de estos hormigones con elementos a escala real, o con diseños constructivos de piezas que requieran un estudio adecuado a sus características. Incluso en estos elementos la sustitución del elemento de refuerzo de acero, elaborando piezas de esta manera que no posean problemas de corrosión derivados del ambiente marino.

En último lugar establecer líneas de investigación futuras para posteriores avances en el campo de desarrollo de hormigones en el campo de la durabilidad. Así también y en conjunto con otros estudios ya desarrollados con fibras de otros tamaños poder continuar el desarrollo de materiales con varios usos y destinos finales. Estudiando el campo de la sinergia de materiales en el ámbito de Canarias y de hormigones con áridos de machaqueo.

### 1.3. PLAN DE ENSAYOS:

El plan de ensayos se ha realizado teniendo en cuenta los parámetros que son necesarios para asegurar el mantenimiento de la calidad mínima exigida a un hormigón y compararlo así con el de partida, y por otro lado con ensayos que reflejaran específicamente las mejoras que nos hemos marcado como objetivo de partida.

Ensayos Físicos					
DOSIFICACIÓN	CONSISTENCIA UNE 83313 UNE 83314	ULTRASONIDOS	DENSIDAD UNE-EN 12350- 6:2006	RETRACCIÓN ASTM C157	MICROSCOPIA
H TIPO	SI	SI	SI	SI	SI
H. CON MICROFIBRAS	SI	SI	SI	SI	SI
H. CON MICROSÍLICE	SI	SI	SI	SI	SI
H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE	SI	SI	SI	SI	SI

Ensayos Físicos		
DOSIFICACIÓN	PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN UNE-EN 12390-8:2001	FISURACIÓN
H TIPO	SI	SI
H. CON MICROFIBRAS	SI	SI
H. CON MICROSÍLICE	SI	SI
H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE	SI	SI

*Tabla 1.1. Tabla de ensayos físicos.*

<b>Ensayos Mecánicos</b>			
<b>DOSIFICACIÓN</b>	<b>COMPRESIÓN SIMPLE UNE-EN 12390-3:2003</b>	<b>TRACCIÓN (BRASILEÑO) UNE-EN 12390-6:2001</b>	<b>FLEXIÓN UNE-EN 12390-5:2001</b>
<b>H TIPO</b>	SI	SI	SI
<b>H. CON MICROFIBRAS</b>	SI	SI	SI
<b>H. CON MICROSÍLICE</b>	SI	SI	SI
<b>H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE</b>	SI	SI	SI

*Tabla 1.2. Tabla de ensayos mecánicos.*

<b>Ensayos Químicos</b>			
<b>DOSIFICACIÓN</b>	<b>ALCALINIDAD UNE 7-296-76</b>	<b>CARBONATACIÓN UNE 112011:1994</b>	<b>DURABILIDAD UNE 83952:2008</b>
<b>H TIPO</b>	SI	SI	SI
<b>H. CON MICROFIBRAS</b>	SI	SI	SI
<b>H. CON MICROSÍLICE</b>	SI	SI	SI
<b>H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE</b>	SI	SI	SI

*Tabla 1.3. Tabla de ensayos químicos.*

#### **1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS:**

El trabajo que se presenta a continuación se desarrolla partiendo de unos objetivos de mantenimiento de las propiedades mecánicas del hormigón y de mejora de los aspectos que influyen en la futura durabilidad del hormigón, como la permeabilidad, la retracción, la fisuración y mejoras mecánicas en el hormigón menos usuales en su empleo como la de la resistencia a impacto. Se estudian los factores que influyen en este aspecto según una serie de dosificaciones y fracciones granulométricas de áridos y fracciones volumétricas de fibra corta de polipropileno y en peso de adiciones tales como el humo de sílice, y se toman las referencias de estudio actual y las líneas de desarrollo que existen seguidas por otros especialistas e investigadores en la materia. Posteriormente nos enfrentamos al problema con un mayor conocimiento de causa desarrollando una serie de ensayos para finalmente obtener unas conclusiones y soluciones al problema planteado inicialmente, e incluso marcar pautas para posteriores trabajos.

Los bloques en los que se divide el trabajo son por tanto seis, la introducción, el estado del arte, los ensayos con la obtención de resultados, las aplicaciones futuras de los materiales, las conclusiones y las líneas de investigación futuras que deja abiertas este trabajo. Se establece también una bibliografía con la que el autor ha encontrado ejemplos que poseen la misma línea de investigación y preocupaciones, para ver en que puntos coincide o se plantea discusión de resultados y de opiniones. Esta se recoge de manera general y no separada por capítulos, poniendo un número de referencia por cada artículo al que se hace mención.

En la introducción se plantean los problemas que se van a estudiar y los datos de partida de la tesis, el objetivo que se persigue y la organización que se ha seguido.

El estado del arte se divide en cuatro cuerpos. El primero desarrolla el estado de los materiales cementicios canarios, estudiando sus componentes tradicionales y los estudiados por otros investigadores, así como la normativa vigente y los daños patológicos más comunes en los hormigones canarios que afecten a la durabilidad como efecto secundario de malas praxis constructivas. Dentro de este aspecto se estudia el

cemento como primer elemento diferenciador del hormigón canario y sus distintas clases resistentes y de composición química, así como los distintos tipos de árido, el comportamiento de los mismos en el hormigón tanto en su fase plástica con la decisiva influencia de los mismos en su consistencia, como en su fase sólida, en el aspecto mecánico y químico. Dentro de los materiales con estudios consolidados se encuentran también los plastificantes y superplastificantes, tanto en hormigones convencionales como en los autocompactos de más actualidad. Como materiales de nuevo uso podemos ver la incidencia de las fibras de polipropileno de mayor longitud de empleo en las mejoras mecánicas de los hormigones confiriéndoles resistencias superiores a flexión y a esfuerzos dinámicos. La normativa de estudio es principalmente la EHE-08 que afecta a nivel nacional a los elementos cementicios, tanto a los hormigones tradicionales como a aquellos que como en esta tesis emplean un conjunto de adiciones.

La segunda parte estudia los distintos materiales que conformarán las dosificaciones de los hormigones, bien por ser de carácter singular en Canarias o bien por ser materiales avanzados uso reducido. Seguidamente se estudian las propiedades de los hormigones, tanto físicas como químicas, estableciendo los problemas que se plantean en cada una y las investigaciones que se desarrollan fuera de Canarias. En último lugar se estudia el proceso corrosivo de las barras embebidas en los hormigones y de los factores que influyen su inicio y desarrollo.

El tercer bloque de la tesis recoge los ensayos y la obtención de los resultados que se han obtenido en los campos de desarrollo, separando y distinguiendo entre las propiedades físicas y químicas con materiales añadidos a la dosificación tipo de un hormigón tradicional canario. En cada aspecto estudiado se realiza un estudio del ensayo, se organizan los resultados y se extraen conclusiones.

En cuarto lugar se establecen relaciones entre los distintos resultados y conclusiones obtenidos en cada uno de los temas desarrollados para así avanzar e entrelazar los temas como un conjunto conexo entre sí.

Se desarrollan aplicaciones de estos hormigones a la realidad constructiva, bien por el ambiente en el que se plantea la utilización de las piezas, o bien por las

condiciones de trabajo. Se apuntan dos ejemplos constructivos con las distintas dosificaciones según sus propiedades obtenidas.

Por último se establecen una serie conclusiones, analizando la relación de los resultados con las causas que originan los mismos, así como con la relación con las referencias de partida, tanto del empleo de los materiales por separado como en el de la sinergia del empleo de las distintas dosificaciones de aditivos.

Por último se plantean líneas de investigación que abre la tesis a otras consideraciones o puntos de estudio. El desarrollo de la tesis ha planteado nuevas salidas y nuevos puntos a estudiar, dentro de cada punto o con el fin primero de un material obtener una nueva propiedad final.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN:**

Los materiales cementicios empleados en Canarias se distinguen del resto principalmente debido al material existente y a su posición de aislamiento geográfico que lo hace depender de sí mismo a la hora de la realización de los hormigones que se emplean.

Las islas Canarias constituyen un conjunto de siete islas situadas en el océano atlántico en el margen Este del mismo, mirando a la costa de poniente del continente africano a unos cien kilómetros del mismo. Se encuentran enclavadas en una corteza oceánica antigua de más de doscientos cincuenta millones de años. La formación volcánica de las mismas es objeto de discusión, siendo la línea más aceptada la de formación de fracturas profundas en la corteza terrestre de amplitud regional, como vía de salida de las corrientes magmáticas.

Se distinguen en la formación de las islas dos etapas: una submarina y una subaérea.

La naturaleza geoquímica y petrológica de los materiales volcánicos del archipiélago canario se caracteriza por presentar asociaciones magmáticas alcalinas, que se corresponden con las propias de islas oceánicas, debido a su alto contenido en Sodio y Potasio. Es en las islas Canarias donde estos materiales volcánicos presentan en relación con otras islas oceánicas, el mayor espectro de rocas, encontrándose términos extremadamente básicos y subsaturados (basanitas, nefelinitas, melilitas, basaltos), términos intermedios (traquibasaltos, tefritas), y tipos ya altamente diferenciados (traquitas y fonolitas) (2).

El origen volcánico de las islas, hace que los materiales sean distintos según las distintas coladas de materiales piroclásticos que en cada zona y tiempo hayan surgido.

Podemos encontrarnos desde zonas con lapilli, a zonas con coladas básicas o ácidas, así como zonas algo más erosionadas, o de aportes aéreos (3), principalmente arenas procedentes de África mediante el llamado siroco (Cercanía con el desierto del Sáhara), o aportes marinos, bien por desgaste de la propia costa o por transporte de arenas mediante las corrientes oceánicas.

Los materiales propios de Canarias empleados en los hormigones son los áridos que llegan a formar el setenta y cinco por ciento del mismo y en menor medida, aunque con gran importancia también en los cementos la puzolana.

El material empleado como árido debido a su resistencia, dureza y facilidad de obtención es el basalto y la fonolita en hormigones estructurales o los piroclastos en hormigones para la fabricación de prefabricados, como el bloque o la bovedilla.

Los áridos empleados son de machaqueo debido a que el origen de las islas es temprano geológicamente hablando, unido a la carencia de ríos o arroyos que conformen áridos rodados. Obtenidos mediante canteras al aire libre y procesados en machacadoras hasta los distintos tamaños requeridos.

El otro material empleado es la puzolana, como adición en el cemento, consiguen un cemento más económico, pues se disminuye la cantidad de cemento Pórtland puro, al ser un elemento bastante común y de fácil extracción, del conocido como “Canto Blanco” en las Islas, y por otro lado un hormigón más resistente en algunos aspectos químicos como veremos más adelante, y más estable (4).

## **2.2. MATERIALES CEMENTÍCIOS CANARIOS:**

### **2.2.1. COMPONENTES TRADICIONALES**

#### **2.2.1.1. EL ÁRIDO:**

##### 2.2.1.1.1. Tipos de rocas según sus características geológicas:

**Basaltos:** son las rocas canarias menos evolucionadas con una composición química muy similar al magma originario generado a varias decenas de kilómetros de profundidad.

Mineralógicamente los basaltos se componen de Feldespatos de un cuarenta a un sesenta por ciento y de Máficos entre un cincuenta y cinco y un treinta y cinco por ciento.

Son áridos con alto contenido en sílice, que le confiere un pH ácido alrededor al 12,5 a los mismos (4).

Son además de gran diversidad estructural y con variaciones de densidad debido a las distintas porosidades con poros abiertos o internos, con un peso específico que varía de 2,93 a 3,10 kg/dm<sup>3</sup>, en los hormigones con empleados los de mayor densidad, constituyendo con estos hormigones con densidades medias-altas superiores a los 2200 kg/m<sup>3</sup>.

**Fonolitas:** son rocas procedentes de magmas secundarios deficientes en SiO<sub>2</sub> en la proporción necesaria para formar silicatos. Son rocas debido a esto ricas en Nefelina (pseudofeldespato o feldespatoide), con un porcentaje mínimo de estos de un diez por ciento. Son rocas sálicas, de acidez intermedia.

Poseen una densidad inferior a los basaltos de un 2,65 kg/dm<sup>3</sup>

Son químicamente inertes (5).

**Puzolanas:** en Canarias la roca es conocida como “Canto Blanco”, las tobas blancas son muy homogéneas y de baja permeabilidad. Pertenecen a la Serie Fonolítica, y se clasifican como Fonolitas Tobas. Su empleo como árido en los hormigones es inusual, aunque sí es común su uso como mampuestos en la arquitectura tradicional canaria.

#### 2.2.1.1.2. Obtención de los áridos.

La obtención de los áridos en Canarias se realiza en canteras a cielo abierto, principalmente en zonas donde la erosión permitió la aparición cercana de las rocas empleadas, tales como los barrancos.

El árido empleado en la tesis procede de la cantera de Arican, situada en el borde oeste del complejo sedimentario aluvial del barranco de Tirajana, excavada sobre mantos de la serie Fonolítica.

La composición química porcentual en peso según análisis químicos es la siguiente (5):

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>58.80 %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>18.13 %</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>4.10 %</b>
<b>FeO</b>	<b>0.56 %</b>
<b>MnO</b>	<b>0.16 %</b>
<b>MgO</b>	<b>0.35 %</b>
<b>CaO</b>	<b>1.68 %</b>
<b>K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+otros</b>	<b>16.22 %</b>

*Tabla 2.1. Composición química porcentual en peso de los áridos de tipo monolítico de la cantera de Aricán (5).*

### 2.2.1.1.3. Análisis de los áridos empleados en canarias:

El módulo granulométrico presenta la dosificación correcta a través de un tamaño de árido máximo para que el resultado final sea lo más compacto posible. Para ello existen distintos métodos teóricos de realizar una dosificación, principalmente Füller o Bolomey. En los hormigones que se han realizado las dosificaciones de partida son cedidas por el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas (ETSALP).

La importancia del módulo granulométrico es debida a su relación con la compacidad con el hormigón, aspecto este que estudiaremos posteriormente.

En los estudios realizados (5) se obtuvieron los siguientes valores de módulos granulométricos, que a pesar de provenir de las mismas canteras difieren de los empleados en las dosificaciones que presentaremos posteriormente:

Árido	Valor ETSALP	Valor tesis
Arena amarilla de playa	1.06	1.64
Arena 0/5 Arican (fonolita de machaqueo)	3.07	3.15
Árido 5/10 Arican (fonolita de machaqueo)	5.68	6.23
Árido 10/20 Arican (fonolita de machaqueo)	6.76	7.06

*Tabla 2.2. Comparación de valores de módulo granulométrico de los áridos fonolíticos y basálticos de la Escuela de Arquitectura de Las Palmas y los empleados en este trabajo.*

Los valores que nos interesa estudiar para nuestras dosificaciones posteriores son aquellos de las fonolitas, cuyo estudio particular realizado en este trabajo se presenta más adelante.

#### 2.2.1.1.4. Coeficiente de forma del árido. Importancia en la dosificación y puesta en obra del hormigón:

El estudio de la forma de los áridos se realiza según la norma UNE EN 933, determinando la granulometría y el tamaño mínimo y máximo del árido con la UNE EN 933-1 y la UNE EN 933-2 respectivamente, así como las condiciones del árido fino total con la UNE EN 933-1. La forma del árido grueso se expresa mediante su índice de lajas, según UNE EN 933-3, y su valor debe ser menor a 35.

El coeficiente de forma de un árido es un número adimensional, resultado de la fracción del volumen del árido y del volumen de una esfera que se circunscribe en el mismo a partir de su diámetro máximo (1). Por lo tanto mientras más cercano a la unidad se encuentre este coeficiente, más redondeado será el árido.

Normalmente los áridos empleados poseen coeficientes de forma del orden de 0,87 en el caso de fonolitas, debido a su tratamiento mediante machaqueo después de su obtención en canteras mediante extracción mecánica. La forma de los áridos machacados depende de la naturaleza de la roca de la que proceden, del tipo de machacadora, de su relación de reducción,..etc. (4).

La importancia de este coeficiente se debe a que esta en relación con la futura trabajabilidad con el árido en el hormigón, pues mientras más lajeados o forma de punta poseen los áridos, con mayor número de aristas, más difícil será su movimiento en la mezcla fresca. Con áridos redondeados se consigue una mayor docilidad de los hormigones y mayores resistencias, mientras que los laminares y aciculares o con forma de agujas dan lugar a hormigones de peor calidad puesto que estas formas no influyen sólo en las resistencias, sino que tienden a orientarse en un plano, acumulando debajo de ellos agua y aire lo que repercutirá desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones (4).

Éstos son algunos de los valores de coeficiente de forma de áridos de la misma cantera de la que se han extraído los áridos de esta tesis (5), se puede apreciar la diversidad de valores debido a ser áridos obtenidos por machaqueo con distinta maquinaria y lugar de extracción:

<i>Tipo de árido</i>	<i>Medidas Coeficiente Forma</i>	<i>Media</i>
Árido 5/10 Arican (fonolita de machaqueo)	0.10/0.10/0.09	0.10
Árido 10/20 Arican (fonolita de machaqueo)	0.24/0.16/0.17	0.19
Árido 20/40 Arican (fonolita de machaqueo)	0.30/0.28/0.26	0.28
Árido 5/10 Carrizal (basalto de machaqueo)	0.17/0.16/0.14	0.16
Árido 10/20 Carrizal (basalto de machaqueo)	0.22/0.15/0.18	0.18
Árido 20/40 Carrizal (basalto de machaqueo)	0.24/0.19/0.24	0.22

*Tabla 2.3. Valores de coeficientes de forma de los áridos de procedencia fonolítica y basáltica (5).*

Los áridos que han sido estudiados, basaltos y fonolitas, poseen diversidad de medida en cada una de las muestras estudiadas por Guigou. Existe no obstante una similitud, el aumento de la granulometría produce un aumento del coeficiente de forma, es decir, los áridos aumentan su forma redondeada.

Podemos observar como los basaltos en la granulometría 5/10 poseen una forma más adecuada que las fonolitas, siendo al contrario en las granulometrías superiores 10/20 y 20/40. Lo normal en las dosificaciones es realizarlas con el material de una misma cantera, como se ha realizado en este trabajo, aunque sería posible por tanto combinar distintos áridos adecuándonos a la forma que más nos interesa, la esférica.

#### **2.2.1.2. EL CEMENTO:**

El cemento es el resultado de la molienda conjunta del producto de la cocción hasta la sinterización de una mezcla de arcilla y de caliza denominada “clinker” y de un material empleado como regulador del fraguado, generalmente yeso dihidratado (4). Los componentes principales o activos del clinker Pórtland son los silicatos tricálcico y bicálcico, el aluminato tricálcico y el ferrito aluminato tetracálcico. De todos estos son los silicatos de calcio (SC<sub>3</sub>, SC<sub>2</sub>) los que componen de un 60 al 80 por 100 de ellos y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. El cemento se puede

presentar además con materiales que aporten una mejora en las características físicas o químicas, denominadas adiciones.

En Canarias el cemento empleado está adicionado principalmente con la Puzolana finamente molida, principalmente por el ahorro en la elaboración del mismo, ya que posibilita la adición de materias crudas o sin cocción al clinker obtenido a altas temperaturas, con una simple molturación conjunta de ambos elementos. Este sistema de incorporar puzolanas a la masa de cemento no sólo disminuye el coste del mismo, sino que a la vez que le aporta cualidades que se estudian más adelante al ayudar a fijar la cal libre y conseguir así hormigones más estables químicamente.

En el Real Decreto 956/2008 de Recepción de cementos (RC-08) se establecen los valores máximos porcentuales de adición puzolánica natural que pueden poseer estos cementos (6):

Denominación	Designación	Máximo %	Mínimo %
Cemento Pórtland con puzolana	Cem II/A-P	20	6
	Cem II/B-P	35	21
Cemento puzolánico	Cem IV/A	35	11
	Cem IV/B	55	36

*Tabla 2.4. Valores máximos porcentuales de adición de puzolana natural en los cementos según RC-08.*

Se distingue entre dos tipos o subgrupos, el II para los cementos Pórtland con adiciones y el IV para cementos puzolánicos, siendo necesario en este caso diferenciar entre paréntesis las siglas de los componentes empleados como adición. El cemento empleado en este trabajo es un puzolánico con adición de puzolana natural cuya sigla en la normativa se designa con la P, con un contenido de puzolana natural de un 30 por ciento y de clinker un 70 % y de clase resistente 32.5 de alta resistencia inicial, siendo por tanto un cemento CEM II/B-P 32.5R. (6)

### **2.2.2. COMPONENTES DE NUEVA INVESTIGACIÓN**

La mejora de los hormigones ha sido una preocupación en la historia de la construcción, el uso de materiales que consiguieran propiedades adicionales o estabilidad en las dosificaciones.

Estas sustancias o productos son aditivos si se incorporan al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, produciendo una modificación deseada en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento (1).

Las adiciones sin embargo son 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 confiere características especiales. En la instrucción actual solo se recogen como tal las cenizas volantes y el humo de sílice (1).

Los aditivos se dividen en cinco grupos según la EHE: reductores de agua/plastificantes, reductores de agua de alta actividad/superplastificantes, modificadores del fraguado / aceleradores / retardadores, inclusotes de aire o multifuncionales, debiendo cumplir la UNE EN 934-2 (1).

Los aditivos pueden tener una “función principal” caracterizada por producir una modificación determinada, y solamente una, de alguna de las características del hormigón, pudiendo tener además una “función secundaria” y accesoria de modificar alguna o algunas de las características de estos materiales, independientemente de la función principal. Se debe tener en cuenta que el efecto de un mismo aditivo en una misma proporción puede ser diferente según el tipo de cemento empleado (4).

A continuación nos centramos en los aditivos y adiciones empleados en los hormigones estudiados en este trabajo, de uso tradicional en Canarias como los modificadores de la reología, principalmente los superplastificantes/reductores de agua de alta actividad, e incorporando otros menos estudiados localmente, como son las

fibras de polipropileno y el humo de sílice, que pudieran incorporar mejoras al hormigón según su uso final.

### **2.2.2.1. MATERIALES PUZOLÁNICOS.**

Las puzolanas son sustancias naturales de composición silícea o silico-aluminosa o combinación de ambas. Las puzolanas no endurecen por sí mismas cuando se amasan con agua, pero finamente molidas y en presencia de agua reaccionan, a temperatura ambiente con el hidróxido de calcio disuelto para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencias. (6)

Están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), debiendo poseer un mínimo de contenido de dióxido de silicio reactivo de un 25% en masa. El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros óxidos. (6)

La RC-08 distingue entre puzolana natural y puzolana calcinada, denominándolas con las siglas P y Q respectivamente. Las naturales con normalmente de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas. Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico. (6)

Existen otros productos de procedencia no natural que confieren propiedades similares que las obtenidas con las naturales P y Q, denominándose de actividad puzolánica. La actividad puzolánica de las adiciones confiere al cemento y al hormigón una mayor durabilidad por resistencia a ataques de aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez. Dota al hormigón de una mayor compacidad e impermeabilidad. Un menor calor de hidratación, e inhibe o contrarresta las expansiones producidas por la presencia de cal libre, magnesia libre, reacción álcalis-áridos...

Entre estos compuestos a parte de la puzolana natural, destacan por su actividad puzolánica el humo de sílice, cenizas volantes y escorias siderúrgicas.

En el proceso de hidratación del cemento, se produce progresivamente una liberación de Cal, (hidróxido cálcico, conocido por Portlandita). Este hidróxido manifiesta una escasa resistencia química frente a aguas agresivas (puras, ácidas,...), disolviéndose progresivamente ante la acción de las mismas. De otro lado, bajo la acción de una elevada temperatura (400 °C) origina óxido de cal o cal viva, cuya rehidratación originaría un fenómeno expansivo. La misión de las adiciones puzolánicas reside en la captación de la cal aportada por el Pórtland, formando silicatos cálcicos, con más durabilidad ante agresiones químicas (5). La adición de puzolanas en el cemento en proporciones del 15 al 25 por ciento es beneficiosa para fijar la cal y reducir la cantidad de sulfato formado (7).

La reacción puzolánica produce silicatos de calcio hidratados de composición similar, pero con un menor radio molar de  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  que aquellos formados por la hidratación de los silicatos tricálcico y bicálcico del cemento Pórtland. Esto produce que los radios de los silicatos de calcio hidratados en relación con el hidróxido de calcio en los productos hidratados aumenten según se produce la actividad puzolánica y la relación molar  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  disminuya con el tiempo (8).

En un cemento Pórtland sin reaccionar el radio molar  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  suele ser de 3.5, mucho mayor que una vez haya reaccionado, momento en el cual el radio molar se sitúa en torno 1.5 debido a que parte del  $\text{CaO}$  se emplea en la formación de ettringita. El uso de un cemento adicionado con puzolana con sílice altamente reactivo permite poseer una mayor cantidad de material cementoso que un cemento sin adición puzolánica (8).

El análisis de la ettringita procedente de cementos puzolánicos y de cementos Pórtland fue estudiado por R. Talero (9). De este se deduce que todas las puzolanas estudiadas consiguieron fijar los sulfatos para la formación de ettringita y que el radio de ettringita desde  $\text{Al}_2\text{O}_3$  formado por los cementos con puzolanas en contraposición con los cementos Pórtland es mayor y en diferentes tipos.

### **2.2.2.1.1. Hormigones con puzolana natural:**

Bien sean morteros basados en arcilla, cal o cemento, la puzolana ha sido una adición beneficiosa empleada desde los tiempos de los romanos, con origen en la localidad de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, de donde recibe su nombre.

En Canarias el empleo de la puzolana como mampuesto en la construcción de fábricas es bastante usual por su generalidad en la geología canaria y a su facilidad de labrado, incluso como sillares para esquinas y huecos. En la isla de Gran Canaria existen canteras del material, extendiéndose de manera natural desde Tenoya hasta Arguineguín, que en su forma de roca se denomina vulgarmente Canto Blanco.

Se trata de una serie de rocas homogéneas, pertenecientes a la serie Fonolítica, se clasifican como Fonolitas Tobas. Su formación se atribuye a torrentes de fango incandescentes de cenizas y agua, acumulando en su recorrido clastos de manera desordenada. Podemos encontrar también a modo de ejemplo entre éstas las cenizas volcánicas, la piedra pómez, las tobas, la escoria y obsidiana.

Las mejoras aportadas por las puzolanas naturales son bastante conocidas y su empleo como elemento que economice el cemento es un aspecto que lo hace aún más atractivo. La proporción máxima que un cemento puzolánico puede poseer de puzolana natural es de un 20% según la normativa para Recepción de cementos (R.C.-08). (6)

Según R.E. Rodríguez Camacho, la importancia del tiempo y la sensibilidad en el curado es mayor en los cementos puzolánicos. El uso de estos cementos en el ataque por sulfatos es idóneo. La puzolana es efectiva en el control de la expansión debida a los áridos alcalinos y silíceos, teniendo en cuenta que no todas las puzolanas lo consiguen al no poseer en su composición estos elementos (10).

La acción catalizadora de la puzolana es lenta, para la captación de la cal liberada y su transformación en silicatos, de los cuales el tricálcico desempeña un papel fundamental en las resistencias iniciales, y el bicálcico que aporta las resistencias a largo plazo. La adición de una fuerte dosis de puzolana a un clinker para un cemento de clase 42,5 le imprimiría un desarrollo de resistencias iniciales deficiente para tal

categoría, y no así en cuanto al largo plazo. Por ello se precisa de un clinker de superior categoría para que, añadida la puzolana, origine un desarrollo de resistencias propio de un clinker de categoría inmediata inferior. Es por ello que en Canarias el cemento empleado sea el de clase resistente 32,5. (5)

#### **2.2.2.1.1. Hormigones con cenizas volantes:**

Las cenizas volantes son un residuo sólido y en estado de fina división procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hogares de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases y recuperado por precipitación electrostática o por captación mecánica. Las cenizas obtenidas por otros procedimientos o con otros orígenes, no se consideran cenizas volantes. (4)

Su empleo como adición en el cemento se debe a su aceptación dentro de los materiales puzolánicos, con capacidad de combinarse con la cal procedente de la hidratación de los componentes activos del cemento Pórtland para dar compuestos, especialmente silicatos hidratados, con los beneficios económicos y medioambientales que su empleo conlleva, al ser un residuo industrial.

Los cementos con adición de cenizas volantes se encuentran dentro del tipo II, existiendo dos tipos de cenizas volantes, la silíceas con designación V y las calcáreas con designación W, pudiendo a su vez poseer dos subtipos según su proporción en la masa del cemento, con rangos del 6-20% para la A y del 21-35 % para la B.(6)

La ceniza volante silícea es un polvo fino de partículas esféricas que consta esencialmente de 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 compuestos, que posee propiedades puzolánicas. La ceniza volante calcárea posee propiedades puzolánicas e hidráulicas, consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), el resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. (6)

También los cementos puzolánicos tipo Cem IV pueden poseer en su masa adiciones de cenizas volantes con rangos del 11-35 % de proporción en masa del

cemento para la subtipo A y con rangos del 36-55 % de proporción en masa del cemento para la subtipo B. (6)

La adición de cenizas volantes se puede realizar en la preparación del hormigón, con la salvedad de que se debe de emplear con hormigones CEM I, llegando a incorporarse hasta en un máximo del 35 % del peso del cemento. Deben de cumplir las especificaciones de la norma UNE EN 450-1. (1)

La adición de cenizas volantes en el hormigón permite corregir la carencia de finos de la arena e incluso de cemento en los hormigones pobres en conglomerante, mejorando al mismo tiempo la docilidad y la cohesión de los mismos, reduciendo la tendencia a la segregación y la exudación. (4)

La importancia de esta adición a nivel de desarrollo más actual es el de su empleo como fino dentro de hormigones que requieren de facilidad de movimiento entre sus partículas y alta homogeneidad de la pasta, como son los hormigones autocompactos. Su empleo ha sido acompañado con el desarrollo de superplastificantes de última generación, realizados con polímeros sintéticos, que consiguen altas docilidades, con mejoras de las consistencias.

La aplicación de las cenizas volantes en hormigones autocompactantes en obra es de uso muy específico en Canarias, como en atezados de viviendas, aunque su empleo en obras de ingeniería civil en España, como la del puente de la Hispanidad en Zaragoza (2001) o la del ayuntamiento del Mollet del Vallés (2002) es también de uso común, y su investigación y desarrollo de nuevas patentes y utilidades cada vez es mayor, como se ha expuesto en el primer congreso español sobre hormigones autocompactantes en Valencia de 2008 (11).

En Canarias las líneas de investigación recientes han sido desarrolladas por R. Santana (12) con hormigones autocompactantes y G. Melián ha innovado en este desarrollo incorporando fibras de polipropileno en los hormigones autocompactantes adicionados con cenizas volantes de Ready Mix, procedentes de la central de Ponferrada. (13).

### **2.2.2.2. COLORANTES:**

La calidad estética de los hormigones es cada vez más demandada, y su empleo como material de acabado tanto en fachadas como en pavimentos es muy usual, combinando distintos diseños con la textura y color en los elementos realizados con este material.

Los colorantes son pigmentos que añadidos a la masa del hormigón en el momento de la mezcla tienen por finalidad dar al mismo una coloración distinta a la gris verdosa que normalmente presenta. Deben ser estables en el tiempo y no alterables a la intemperie, siendo compatible con el cemento. (4)

Los pigmentos empleados como colorantes del hormigón son de naturaleza inorgánica debido a la gran estabilidad del color que presentan. Pueden ser naturales procedentes de tierras colorantes que se generan en la desintegración de ciertas rocas ricas en óxidos metálicos o bien, ser colorantes minerales artificiales.

La investigación de estos aditivos en los hormigones canarios ha sido desarrollada por J.M. Pérez (14), con colorantes tanto naturales como sintéticos.

### **2.2.3. NORMATIVA VIGENTE.**

La normativa vigente en Canarias se relaciona con la estatal referenciada a zonas costeras del resto del ámbito nacional, por lejanía o cercanía a la costa. La distinción de los hormigones canarios no ha sido desarrollada aún como elemento específico debido a sus notables diferencias en su composición. Principalmente afectan al hormigón dos normativas, Instrucción de recepción de cementos (RC-08) en cuanto al cemento a emplear en su realización y la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) en lo referente a su uso general en obras de arquitectura e ingeniería.

De la normativa se extraen para esta tesis aquellos aspectos que se refieren a la durabilidad. La durabilidad de una estructura de hormigón es según la EHE-08, la capacidad para soportar durante su vida útil para la que ha sido proyectada, las

condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural (1).

### 2.2.2.2. Instrucción de hormigón estructural (EHE).

A continuación describiremos los aspectos que en esta normativa afectan a la durabilidad de los hormigones específicamente para Canarias, y las líneas a seguir en sus recomendaciones.

#### 2.2.2.2.1. Clasificación por ambientes.

El hormigón será estudiado en el ambiente que se desarrolla de manera especial, ya que éste fijará una serie de riesgos en durante la vida del mismo, y cuanto mejor se conozcan y se planteen de antemano, más efectiva será la eficacia en la durabilidad del mismo. Para ello la E.H.E.-08 ha fijado los ambientes según la tabla:

CLASE	SUBCLASE	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
No agresiva		I	Interiores de edificios Elementos de hormigón en masa
Normal	Humedad alta	II a	Interiores con alta humedad relativa (>65%) o condensaciones. Exteriores con P media anual > 600 mm sin cloruros Elementos enterrados
	Humedad media	II b	Exteriores con P media anual < 600 mm sin cloruros
Marina	Aérea	III a	Estructuras a menos de 5 Km. de la costa
	Sumergida	III b	Elementos sumergidos permanentemente
	Zona de mareas	III c	Elementos en zonas de carrera de mareas
Cloruros no marinos		IV	Elem. no impermeabilizados en contacto con cloruros (piscinas, EDAR) Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas

*Tabla 2.5. (8.2.2. EHE-08.) Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras (1).*

En Canarias podemos afirmar que la mayoría de las obras son desarrolladas con hormigón armado y que éstas se sitúan en zonas costeras a menos de 5 km. de la costa, por lo que el Ambiente IIIa es generalizado, con ataque por corrosión por cloruros (ataque marino aéreo), y con ambiente IIb en zonas alejadas de la costa.

Debemos de tener en cuenta que una estructura puede verse sometida a distintos tipos de ambiente en sus distintos elementos estructurales para una correcta estrategia en la durabilidad (1).

Una forma de garantizar la durabilidad del hormigón así como la protección de las armaduras frente a la corrosión consiste en obtener una permeabilidad reducida en ambientes agresivos. La clasificación establecida por ambientes que realiza la instrucción de hormigones influye en la disposición de las barras de acero en los elementos realizados con hormigón armado, mediante el establecimiento de un recubrimiento al exterior y de unas resistencias mínimas de los hormigones, que se obtendrán respetando una relación agua/cemento determinadas y unas cantidades de cemento preestablecidas.

#### 2.2.2.2.2. Cantidad mínima y máxima de cemento.

Uno de los factores clave será la cantidad de cemento a emplear, ya que es el elemento que conglomerará a todos los materiales que conforman el hormigón, y una mayor cantidad de éste supondrá como se explicará más detenidamente posteriormente unas mayores reservas resistentes a la pérdida de alcalinidad por carbonatación. No obstante se marca un máximo en la cantidad del mismo en 400 kg/m<sup>3</sup> pudiendo ser mayor en ocasiones justificadas.

Podemos apreciar como aumenta la cantidad cementos hasta este máximo según los requerimientos de resistencia química a los que se ve sometido el hormigón en los ambientes según estos sean más agresivos.

Hormigón		CLASE DE EXPOSICIÓN									
		I	II a	II b	III a	III b	III c	IV	H	F	E
Mínimo	En masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	275
cemento	Armado	250	275	300	300	325	350	325	300	325	300
(kg/m <sup>3</sup> )	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	300	325	300

*Tabla 2.6.(37.3.2.a. EHE-08). Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.*

Según la tabla anexa en el ambiente IIIa, muy usual en Canarias, la cantidad mínima de cemento a emplear en hormigones tanto en masa como armados es de 300 kg/m<sup>3</sup>.

#### 2.2.2.2.3. Relación Agua/Cemento (A/C).

La relación agua/cemento será determinante ya que un exceso de la misma generará una mayor porosidad por pérdida de agua en la evaporación, ya que gran parte de la misma no será necesaria para la creación de cristales y geles de cemento, dejando el hueco que ocupaban como poros, y capilares en su ascenso a la superficie. Se busca

por tanto que esta red de poros y capilares ocupen el menor volumen y estén lo peor intercomunicadas en lo posible.

Hormigón		CLASE DE EXPOSICIÓN									
		I	II a	II b	III a	III b	III c	IV	H	F	E
Máxima	En masa	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
relación	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,55	0,50	0,50
a/c	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50

*Tabla 2.7. (37.3.2.a. EHE). Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.*

La relación A/C que la E.H.E.-08 determina para un hormigón en el ambiente IIIa es de 0,50. Vemos como una reducción de ésta relación es fundamental en el aumento agresivo del medio en el que se sitúa el mismo.

#### **2.2.2.2.4. Valores máximos de abertura de fisura. ( $w_k$ ).**

La facilidad de fisuración del hormigón es un inconveniente que puede manifestarse en cualquier momento de la vida de este debido a su baja resistencia a tracción y reducida tenacidad (4)

El articulado realizado por la instrucción de hormigones (E.H.E.-08) consciente del problema de fisuración del hormigón en zonas a tracción, debido a su nula o baja capacidad de deformación a tracción, fija un máximo de la anchura de las fisuras producidas, ya que la abertura de las mismas determinará su profundidad, que aumentaría de no ser controlada el área de ataque y la cercanía a las armaduras. El artículo que se expone a continuación recoge fisuras impuestas por trabajo a tracción del hormigón por deformaciones impuestas o acciones directas, no se recogen las debidas a la retracción plástica o asentamiento plástico, producido en las primeras horas después del amasado, pues éstas se deben controlar con los valores de dosificación, curado...etc.

Las fisuras de amplitud menor a 0,05mm se consideran como microfisuras y no son perceptibles a simple vista, careciendo de importancia en la interrupción que producen del monolitismo e impermeabilidad del hormigón. Las fisuras de amplitud entre 0,1 y 0,2 mm no suelen ofrecer peligro de corrosión de armaduras salvo que se de que el medio sea agresivo (4).

La  $W_k$  es la abertura característica de fisura, que se calculará por la siguiente fórmula y con los siguientes valores (1):

$$W_k = \beta S_m \varepsilon_{sm}$$

*For. 2.1. Fórmula de cálculo de fisura característica en hormigones según EHE-08 (1).*

Donde:

$\beta$ : es el coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico, cuyo valor vale 1,3 para la fisuración producida por las acciones indirectas solamente (con menor dispersión de fisuras) y 1,7 para el resto de los casos.

$S_m$ : es la separación media de fisuras, expresada en mm, dependiente del recubrimiento, de la distancia entre barras longitudinales y su diámetro, y del diagrama de tracciones de la sección.

$\varepsilon_{sm}$ : es el alargamiento medio de las armaduras, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón entre fisuras.

CLASE	SUBCLASE	DESIGNACIÓN	W máx. (mm)	
			Hormigón armado (para la combinación cuasipermanente de acciones)	Hormigón pretensado (para la combinación frecuente de las acciones)
No agresiva		I	0,4	0,2
Normal	Humedad alta	II a	0,3	0,2
	Humedad media	II b	0,3	0,2 <sup>(1)</sup>
	Aérea	III a	0,2	Descompresión.
Marina	Sumergida	III b	0,2	Descompresión.
	Zona de mareas	III c	0,1	Descompresión.
Cloruros no marinos		IV	0,2	Descompresión.

*Tabla 2.8. Valores máximos de abertura de fisuras según ambiente. (5.1.1.2 EHE-08 (1)).*

La fisura característica  $w_k$  debe ser menor que  $w_{max}$  según el ambiente en el que se establezca la estructura. Podemos apreciar también la disminución del ancho de fisura con el aumento de agresividad del ambiente. El articulado estudia también la fisuración por esfuerzo a cortante limitando tan sólo la separación entre estribos en piezas con necesidad de disponer armadura a cortante, y por esfuerzo a torsión.

En nuestro caso la importancia de la abertura de las fisuras es que se pueden constituir en entradas de agentes externos en el hormigón, el ancho de las mismas se encuentra en relación con la longitud y profundidad de las mismas, aumentando la permeabilidad del hormigón. Existen distintos tipos de fisuras según su origen, pueden ser por asentamiento plástico, retracción plástica, de origen térmico, por retracción hidráulica, por corrosión, por reacción álcali-árido o por cargas de servicio. De estas las se estudian en este trabajo con especial atención son las de retracción plástica, ya que pueden alcanzar anchos importantes de entre 2 y 4 mm y que se producen desde las primeras horas de vida del hormigón, pudiendo ser origen de otras posteriores.

#### 2.2.2.2.5. Impermeabilidad del hormigón.

La permeabilidad del hormigón debe ser comprobada en aquellos hormigones que se empleen en elementos que se sitúen en las clases generales de exposición III y IV, o cuando el ambiente presente cualquier clase específica de exposición. (1)

Esta comprobación se realiza mediante el método de determinación de la profundidad de agua bajo presión, según la UNE EN 12390-8, desarrollado más adelante en esta tesis. Un hormigón será suficientemente impermeable al agua si los resultados obtenidos mediante este ensayo cumplen simultáneamente lo determinado en la tabla 37.3.3 de la EHE-08.

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb(sólo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

*Tabla 2.9. Valores máximos y medios para la profundidad de penetración de agua bajo presión. (37.3.3 EHE-08 (1)).*

#### 2.2.2.2.6. Consideraciones adicionales sobre la durabilidad (Anejo 9°).

La EHE-08 establece una vida útil para las obras de hormigón armado según su uso, estableciendo pautas para el cálculo del mismo. La comprobación del Estado Límite de durabilidad, se realiza mediante un procedimiento de carácter

semiprobabilista de forma análoga al adoptado para el resto de los estados límite. En la comprobación del Estado Límite de durabilidad, se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d$$

donde:

$t_L$  Valor estimado de la vida útil

$t_d$  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:

$$t_d = \gamma_t t_g$$

donde:

$t_d$  Vida útil de cálculo

$\gamma_t$  Coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará  $\gamma_t = 1,10$

$t_g$  Vida útil de proyecto

*For. 2.2. Fórmula de cálculo del estado límite de durabilidad. (Anejo 9 EHE-08 (1)).*

Establece dos modelos para el cálculo de la durabilidad de la estructura, el método general y el método de durabilidad en los procesos de corrosión, que incluye el modelo de carbonatación y el de penetración de cloruros, que veremos detalladamente en el capítulo 2.5 de esta tesis. La EHE-08 tiene en cuenta la contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de la armadura, si son compactos, impermeables, definitivos y permanentes. (1)

#### **2.2.4. DAÑOS COMUNES EN LOS HORMIGONES CANARIOS.**

En general los daños en el hormigón se producen desde su producción, vertido, curado y posterior vida útil del elemento, bien por mala disposición constructiva, mal uso o por una conservación y mantenimiento no adecuados.

Según C. Oyarzabal, basándose en estudios del Bureau Seguritas, afirma que los fallos en el proceso de construcción son un 43% de fallos de proyecto, un 28% de ejecución, un 14 % fallos de los materiales, un 10% de uso y un 5 % de distinta clase. (15).

Los principales problemas que se le plantean al hormigón durante su vida útil es la de la resistencia a los ataques químicos a que se expone en el ambiente normal de Canarias, y en mayor medida en las zonas costeras.

Este aspecto es muy importante ya que es en estas zonas donde se ha asentado la mayor parte de la población en Canarias y por tanto la mayor parte de la edificación civil se expone a las condiciones de ambiente marino especificadas en la EHE-08 como IIIa, a menos de 5 km de la costa, por ataque de cloruros de origen marino. Esto implica una resistencia mínima de 30 MPa en los hormigones empleados, un recubrimiento nominal de 35 mm a la barra de refuerzo de acero, una dosificación con relación Agua-Cemento de 0,50, una cantidad mínima de cemento de 325 kg/m<sup>3</sup>, con una serie de cemento recomendados por parte de la Instrucción y una especificación para la profundidad máxima de 50 mm y para la profundidad media de 30 mm según ensayo de penetración de agua a presión UNE EN 12390-8. (1)

En las zonas de costa, el efecto de “niebla” o aerosol marino, se produce por entrada del agua de mar en suspensión por el batir de las olas y el viento es muy común. Esta agua transportada por el viento se incrusta en las fachadas de las edificaciones de primeras líneas especialmente, encontrando los huecos y poros en el hormigón y penetrando lentamente en el mismo con la humedad.



*Fig. 2.1. Imagen de zona costera del litoral de Gran Canaria, Playa del Hombre, Telde, donde se aprecia la entrada de vientos cargados de humedad y sal.*

El estudio realizado en Brasil por G.R. Meira (16) sobre la relación entre la distancia a la costa y la deposición de cloruros por el aerosol marino, nos hace pensar que la consideración del ambiente de la Instrucción (EHE-08 tabla 8.2.2) es demasiado genérico, y que el efecto de este fenómeno natural en la cantidad de cloruro transportado difiere según la orientación y distancia de la costa, y sus vientos predominantes.

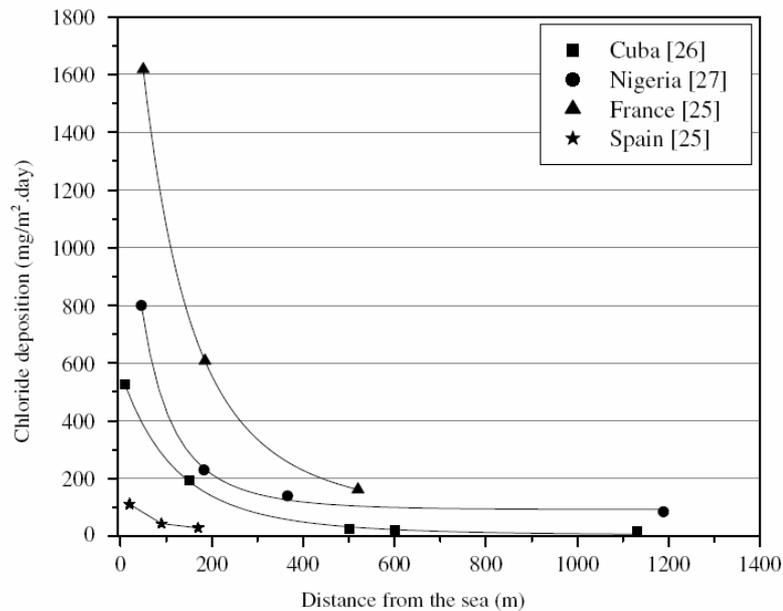


Fig. 2.2. Gráfico de relación de la cantidad de cloruros y la distancia del mar en muestras obtenidas en distintos países (16).

Podemos apreciar que las relaciones varían en gran medida según la región medida. Produciéndose una relación logarítmica en las zonas cercanas de la costa, con mayor incidencia los primeros doscientos cincuenta metros especialmente. Según estos datos se debe ser mucho más preciso en el establecimiento de los ambientes a los que se va a ver expuesta la estructura, pudiendo establecer zonas geográficas diversas con relación a la distancia al borde marino y a la incidencia del viento o planos de exposición dentro de una estructura de un edificio.

El ataque químico afecta por un lado al hormigón y por otro a las barras de refuerzo de acero embebidas en el mismo mediante mecanismos de corrosión. Dentro del ataque químico al hormigón se estudia en esta tesis la carbonatación y su relación con su morfología y propiedades físicas, analizando también su permeabilidad, retracción y fisuración. Existen otros daños patológicos de naturaleza química como de ataque de aguas puras, sulfatos...etc, que en Canarias no se suelen dar y que por tanto no se desarrollan en este trabajo. No obstante, se deduce que en cualquier caso se deben desarrollar hormigones con mayor grado de impermeabilidad para la protección ante los ataques químicos. (1)

Los daños patológicos pueden ser también de carácter mecánico, que a su vez pueden producir daños químicos posteriormente, por la fisuración o rotura de los mismos como nuevos puntos de entrada de agentes externos. Las acciones a las que se enfrenta el hormigón pueden ser continuas en el tiempo –sometimiento a cargas propias y muertas o de uso- o fortuitas –por agentes naturales-, pudiendo ser cargas dinámicas (por ciclos) o estáticas (continuas).

La tesis doctoral de G. Melián desarrolla un hormigón capaz de resistir grandes sollicitaciones de tipo mecánico, producidos por sismo y viento en Canarias (13), atendiendo a las cargas dinámicas a las que se expone el hormigón en esos supuestos.

## **2.3 MATERIALES CEMENTICIOS AVANZADOS:**

El desarrollo del hormigón y sus compuestos ha llevado a lo largo de la historia un proceso de mejora muy lento en épocas antiguas, mientras que hoy día se innova cada día aumentando la versatilidad de este material.

Este avance también posee un lado menos positivo, y es aquel de la creencia de que cualquier materia o material puede introducirse en el hormigón sin afectar a una serie de parámetros que inicialmente no se habían tenido en cuenta.

Es por ello que a la vez que se estudian los materiales en la siguiente tesis para mejoras específicas, se ha ido comprobando que se mantenga la resistencia mecánica a compresión y tracción, la docilidad, la permeabilidad, buscando que la mejora en un campo mantenga las premisas básicas que se piden a un hormigón de partida.

### **2.3.1 HORMIGONES CON FIBRA.**

Las fibras en morteros de barro y cal se emplean desde tiempos lejanos en zonas de autoconstrucción de adobes, dándole a los mismo algo de consistencia y de resistencia a la rotura en materiales que de por sí se disgregarían.

El hormigón al igual que otros materiales pétreos posee bajas resistencias a tracción y es mediante barras de acero embebidas en su masa como se consigue mejorar este aspecto.

Hoy día como veremos a continuación el empleo de fibras de longitud variable de materiales diversos se plantean como alternativa. Podemos verlas no sólo en el hormigón sino también en yesos y escayolas.

La EHE-08 en su Anejo 14 realiza una serie de recomendaciones para la utilización de hormigón reforzados con fibras (HRF), definiéndolos como aquellos que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su

masa, empleados con finalidad estructural, sustituyendo parcial o total de la armadura en algunas aplicaciones, o no estructural, con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración. (1)

### **2.3.1.1. TIPOS DE FIBRAS.**

El empleo de fibras como refuerzo materiales de matriz frágil para mejorar sus características mecánicas es muy antiguo, aunque podemos decir que el desarrollo moderno de las fibras como adición en matrices cementosas data de 1960. Las primeras fibras empleadas fueron las de acero, que con la aceptación de éstas por parte de la industria de la construcción favoreció el desarrollo de otras, como de acero con diversas formas, acero inoxidable, poliméricas y minerales. También han ido apareciendo nuevas técnicas de fabricación y se han desarrollado conjuntamente nuevas aplicaciones (17).

En primer lugar podemos clasificar las fibras por el material que las conforma. Las fibras se dividen principalmente en orgánicas, que pueden ser naturales o sintéticas, e inorgánicas, que pueden ser naturales, sintéticas, metálicas, cerámicas...etc. La EHE-08 clasifica las fibras según su naturaleza en fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas (fibra de vidrio). (1)

Las fibras de acero deben estar conformes con la UNE 83500-1, pueden clasificarse según su proceso de fabricación en trefiladas (Tipo I), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por rascado en caliente (Tipo III) u otras (Tipo IV). Su forma, que influye en la adherencia de la fibra con el hormigón, puede ser recta, ondulada, corrugada, conformadas con extremos de distintas formas, ...etc. (1)

Las fibras poliméricas poseen una gran variedad, siendo las más empleadas las acrílicas, de aramida, carbono, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. A continuación presentamos un cuadro con las fibras comerciales más significativas y sus propiedades físicas.

Polímero	Rigidez (GPa)	Deformación rotura (%)	Módulo de Young (GPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de humedad a 21° C y 65 % HR, (%)
Poliéster	0,37-0,73	13-40	2,1-3,7	1380	0,4
Carbono	3,1	1	227	1730	-
Nylon	0,23-0,60	25-65	0,5-2,4	1130	4-5
Rayon	0,25-0,42	8-30	0,8-5,3	1500	11-13
Acetato	0,14-0,16	25-45	0,41- 0,64	1320	6
Acrílicas	0,22-0,27	35-55	0,51- 1,02	1160	1,5
Olefinas	0,16-0,44	20-200	0,24- 3,22	910	0,01
Vidrio	4,6	5,3-5,7	89	2490	-
Aramidas	2,8	2,5-4,0	113	1440	4,5-7
Fluoro- carbono	0,18-0,74	5-140	0,18- 1,48	2100	-

*Tabla 2.10. Propiedades mecánicas y físicas de algunas fibras comerciales. La rigidez medida en gigapascales como relación entre la deformación y la tensión que es capaz de resistir la fibra. En el gráfico tensión-deformación la tenacidad corresponde al área encerrada por la curva dibujada en su trabajo hasta la rotura.*

Las fibras poliméricas se rigen por la UNE 83500-2, pudiendo clasificarse según el proceso de fabricación en molofilamentos extruidos (Tipo I) y en láminas fibriladas (Tipo II). Según sus dimensiones las podemos clasificar en microfibras si el diámetro de estas es menor a 0,30 mm o macrofibras si el diámetro es mayor a 0,30 mm. (1)

En esta tesis la fibra empleada es la de polipropileno con finalidad no estructural. Según la clasificación determinada por la EHE-08 la podemos definir en cuanto a su fabricación de tipo I y según sus dimensiones podemos determinar que es una microfibra. En el siguiente apartado se presentan de manera más detalladas sus características.

### 2.3.1.2. PROPIEDADES DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO.

Las fibras de polipropileno pertenecen al grupo de las poliolefinas, que son fibras sintéticas compuestas por cualquier tipo de polímero sintético de cadena larga compuesto de al menos en un 85 % en peso por etileno, propileno u otras unidades de olefinas.

El polipropileno posee la siguiente formulación química  $-\{\text{CH}-\text{CH}_2\}_n-$   
CH<sub>3</sub>

Las poliolefinas son hidrófobas en fase cristalina y resistente a la mayoría de los solventes, de ahí sus buenas cualidades frente a las agresiones ambientales y resistencia a la degradación. Son buenas en refuerzos de materiales cementíceos, altamente alcalinos en la mayoría de los casos, así como para refuerzo de yesos y escayolas, de pH menos básico, incluso ácido.

Las principales ventajas de las fibras de polipropileno (PP) son su bajo coste, su baja densidad y por lo tanto bajo peso, como también su flexibilidad. Su estabilidad, posibilidad de colocación y de diferentes texturas fueron características que se desarrollaron en los años setenta y que lo hace un material de fácil comercialización. El polipropileno isotáctico fibrilar se empezó a comercializar hacia 1961 y sus primeras aplicaciones fueron en la fabricación de alfombras, moquetas y cortinas.

Polímero	Tg, (°C)	Tm, (°C)	Temperatura Ablandamiento (°C)	Temperatura descomposición térmica (°C)
Polietileno alta densidad	-120	130	125	-
Polipropileno-i	-20	170	165	290
Poli(1-buteno)-i	-25	128	-	-
Poli(3-metil-1-buteno)-i	-	315	-	-
Poli(4-metil-1-penteno)-i	18	250	244	-
Poli(etileno tereftalano)(PET)	70	265	235	400
Nylon 6,6	50	264	248	360

*Tabla 2.11. Propiedades de poliofinas comerciales y otros polímeros utilizados para fabricar fibras. (i significa isotáctico). Siendo Tg la temperatura de transición vítrea y Tm la temperatura de fusión de los cristales de la región cristalina del polímero.*

Las fibras de polipropileno al igual que otras de su generación poseen distintos tamaños según la finalidad de uso de las mismas. La resistencia mecánica de la fibra está ligada a su sección, mientras que la longitud será la que determine la capacidad de anclar la fibra al hormigón.

Las fibras largas o macrofibras (1) son empleadas con fines normalmente estructurales. G. Melián empleó las fibras largas de polipropileno en el control de hormigones canarios a cargas estáticas y dinámicas producidas por viento y sismo, consiguiendo en su estudio hormigones dúctiles y con capacidad de respuesta a cargas cíclicas (13).



*Figura 2.3. Vista de elemento a flexión de hormigón reforzado con fibra de polipropileno. El trabajo de la fibra se produce en la zona a tracción de la pieza, con mayor tensión en las fibras más alejadas del eje, que sufren una mayor deformación.*

La longitud de la fibra es importante en relación con su sección o diámetro. Es aceptado que las fibras con mayores longitudes y mayores radios longitud/diámetro consiguen mejores rendimientos de resistencias y de absorción de energía tanto como sean capaces de ser mezclados, puestos, compactados y puestos en trabajo (17).

En el control de la fisuración la fibra a emplear no tiene la necesidad de resistir grandes tensiones, ni en una sola dirección, ya que éstas serán impredecibles. Esta escasa tensión a la que deben resistir favorece que la fibra no necesite gran longitud ni diámetro, ya que su anclaje no será excesivamente amplio. Esta medida favorecerá la fácil dispersión en el hormigón sin modificar en demasía su docilidad y puesta en obra posterior.

Las fibras empleadas en desarrollo de éste trabajo han sido proporcionadas por la marca comercial GRACE, nombre comercial Grace Microfiber, cuya ficha técnica acompañamos a continuación para las microfibras:

<p><b>LONGITUD DE FIBRA = 19 mm.</b></p> <p><b>ABSORCIÓN = NULA.</b></p> <p><b>PESO ESPECÍFICO = 0,91.</b></p> <p><b>MÓDULO DE ELASTICIDAD = 3,50 GPa.</b></p> <p><b>PUNTO DE FUSIÓN = 160 °C.</b></p> <p><b>PUNTO DE IGNICIÓN = 590 °C.</b></p> <p><b>RESISTENCIA A ÁLCALIS, ÁCIDOS Y SALES = ALTA.</b></p> <p><b>DOSIFICACION (en hormigones)= 300-1800 g/m<sup>3</sup>.</b></p> <p><b>DOSIFICACIÓN RECOMENDADA (en hormigones)= 600 g/m<sup>3</sup>.</b></p>
---

*Tabla 2.12. Propiedades de fibra corta de polipropileno del modelo comercial Grace Microfiber, empleada en este trabajo (18).*

En el hormigón fresco (en sus primeras 24 horas), se puede producir la fisuración debido a puede estar sometido a cambios dimensionales, debido a la retracción, que puede generar tensiones que son superiores a la resistencia del material en este periodo. Es en este periodo cuando el empleo de fibra corta en pequeñas fracciones volumétricas puede ser efectivo para el control de la fisuración. (19)

Con el trabajo de la fibra corta se evita la rotura y la formación de fisuras en el hormigón, lo que beneficia a éste en el intento de conseguir una permeabilidad menor. Hay que recordar que las fisuras, a mayor ancho y mayor profundidad, valores estos relacionados, son puntos de acceso de elementos nocivos, además que ya en sí mismo pueden reducir el recubrimiento.

### **2.3.1.3. DURABILIDAD DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO.**

La durabilidad de las fibras es otro factor a tener en cuenta en el rendimiento de la misma a largo plazo. Mientras que en las fibras de acero la primera preocupación es la corrosión, en las fibras de polipropileno debemos tener en cuenta la durabilidad y eficacia de estas por sí mismas en el ambiente alcalino del hormigón. (17)

Las fibras se encuentran protegidas por un encimaje externo hecho de resina que la protege del exterior y que permite trabajar con la misma sin problemas. La

durabilidad de las fibras de polipropileno es más complejo que el de barras de acero. Ya que la degradación de las fibras de polipropileno depende de la resina de la fibra en sí, de ambas a la vez y de la interfase de unión entre ambas.

### 2.3.1.3.1. Temperatura.

En temperaturas extremas son inflamables, y en caso de incendio su resistencia se vincula totalmente con la de la resina, arde a una temperatura de 150 a 200 °C. mientras otras fibras poseen temperatura de ignición diversas, las de Aramida 200 °C, las de vidrio entre 300-500 °C, y las de carbono entre 800-1000°C en ambientes de baja oxidación.

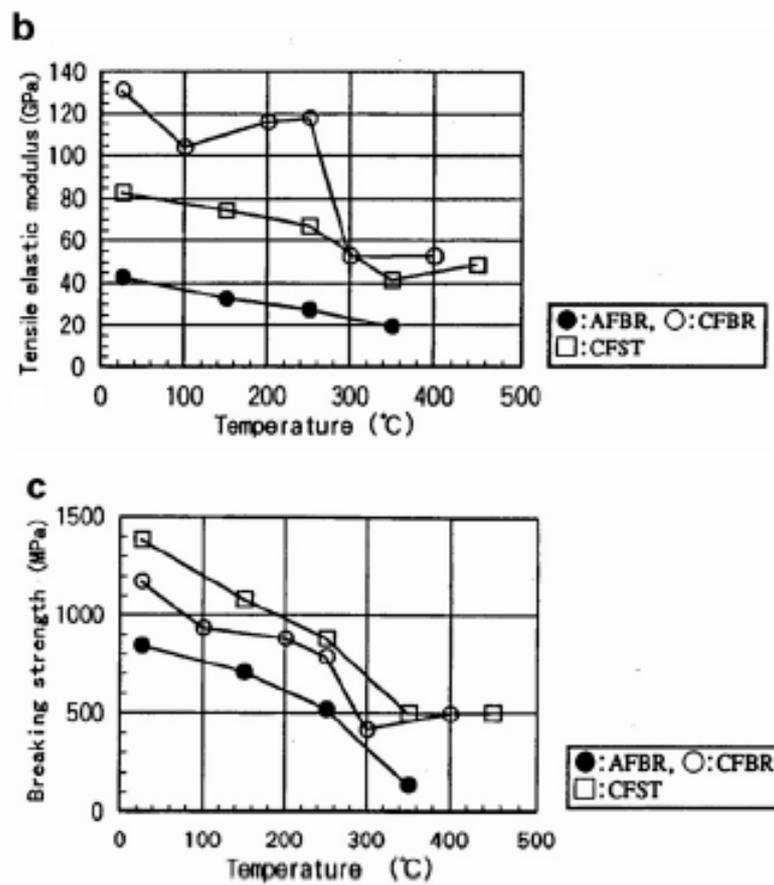
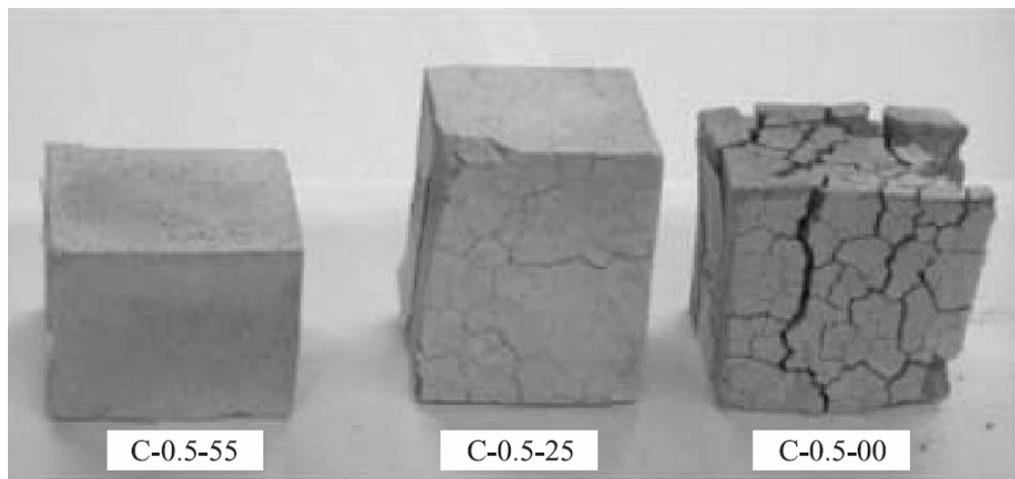


Fig. 2.4. Efecto de la temperatura en la variación del módulo elástico, y de la resistencia de rotura a tracción según estudios realizados por Francesca Ceroni (20).

Y. Xu (21) investigó en pastas de cemento endurecidas con y sin fibra, estudiando el efecto de dilatación y contracción térmica en los hormigones expuestos a cargas y ciclos térmicos extremos. La pasta de cemento generalmente a elevadas temperaturas, puede partir debido a la deshidratación y descomposición de hidratos, mientras que los áridos suelen aumentar previo a la desintegración. A temperaturas de 150 a 300 °C, la pasta de cemento comienza a contraer, y a los 800°C la pasta de cemento endurecido puede contraer hasta un 2,2 %. A estas temperaturas las tensiones térmicas y la fisuración se desarrolla.

En rápidos aumentos de temperatura las capas externas del hormigón se separan de la masa, debido a que el hormigón es un pobre conductor, absorbiendo tensiones diferenciadas entre exterior e interior de la masa.

La fisuración comienza alrededor de los cristales del hidróxido cálcico y progresa a zonas donde los granos de cemento no hidrataron correctamente. Esta fisuración a microescala se denomina microfisuración.



*Fig. 2.5. Fisuración de probetas cúbicas de pasta de cemento con porcentajes de fibras y relación A/C 0.5 después de exponerse a 650°C (21).*

La investigación realizada por W.P.S. Dias (22), con dosificaciones de fibras y diez por ciento de cenizas volantes, consiguió reducir la fisuración superficial de la

masa de cemento desde el enfriamiento hasta una temperatura de 600°C, mejorando de esta manera la resistencia en 300°C.

Las acciones térmicas influyen debido a la diferencia de los coeficientes térmicos entre hormigón y fibra incluso dependiendo si se produce en sentido transversal o en el longitudinal de la fibra. En concreto el coeficiente de dilatación térmica de la fibra es del orden de cinco veces mayor que la del hormigón, introduciendo en la unión tensiones radiales o reduciendo la capacidad de unión (20).

Los ciclos térmicos incluso aquellos de congelación dañan la unión en la interfase del hormigón, incrementando la apertura de fisuras.

La variación de la temperatura afecta más a la matriz que a la fibra. Tanto el módulo elástico como la resistencia disminuyen con el aumento de la temperatura especialmente si se produce prolongadamente en el tiempo y de manera constante.

#### **2.3.1.3.2. Radiación ultravioleta.**

Los rayos ultravioleta degradan las fibras poliméricas, reduciendo hasta en un 13% la resistencia después de su exposición en test de 2500 horas en fibras de Aramida, y un 8% después de 500 horas en fibras de vidrio, y sin efecto en las de carbono. Algunos resultados combinando ultravioletas con exposición exterior han demostrado bajadas de las resistencias en las fibras de carbono de 0-20%, en las de Aramida de 0-30% y las de vidrio de 0-40%. Este efecto no se produce en el interior del hormigón aunque su almacenamiento debe ser cuidadoso con este aspecto (20).

#### **2.3.1.3.3. Acción química.**

La degradación por ataques químicos se produce debido a la fisuración de las fibras en la matriz y la combinación en condiciones de trabajo de la fibra y de tensión, favoreciendo la entrada de agentes externos nocivos hasta la fibra. Hay un límite bajo el cual la microfisuración en la matriz no se produce, y es la capilaridad, la porosidad o las imperfecciones las que dejan desprotegidas a la fibra ante ataques químicos (20).

El agua de mar con el ión cloro afecta principalmente a las fibras de vidrio, no siendo así en las de aramida y carbono.

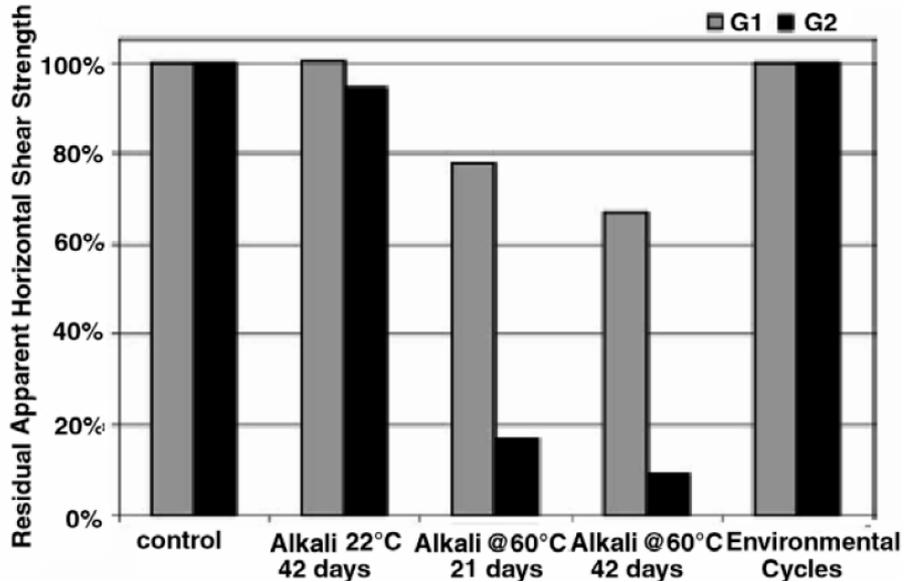
#### **2.3.1.3.4. Fatiga.**

Es la degradación del material por el efecto continuado de una serie de cargas en el material. Se puede llegar a perder hasta un 10% de la resistencia a la carga estática inicial por cada logaritmo de diez de la vida de la fibra en las cargas cíclicas.

#### **2.3.1.4. LAS FIBRAS EN EL AMBIENTE CEMENTOSO.**

Uno de los principales problemas de la corrosión de las barras de acero es el de la carbonatación del hormigón y de la pérdida de pH en el mismo en este proceso, y la reducción de alcalinidad, dejando al acero sin protección. La corrosión no afecta así en el resto de las fibras de composición plástica. Podemos decir que la protección con altos valores de pH del hormigón beneficiosa para las barras de acero no lo es tanto para las fibras, y la pérdida de alcalinidad viene bien (20).

Las soluciones acuosas con altos valores de pH erosionan la resistencia de las fibras de vidrio, dependiendo en gran medida de la resina que rodee la fibra, siendo más resistentes las de viniléster que las de poliéster. Las fibras de carbono no absorben líquidos y son resistentes a los ácidos, álcali y elementos orgánicos.



*Fig.2.6. Gráfico de degradación de las resinas causadas por el álcalis. G1 fibras con resina termoplástica y G2 fibras con resinas de poliéster (17).*

Es por tanto que la pérdida de resistencias, tenacidad y la unión de la interfase fibra-hormigón influye a su vez en la resistencia y tenacidad del hormigón reforzado con fibras.

### **2.3.1.5. PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL HORMIGÓN CON FIBRAS.**

El comportamiento del hormigón fresco y su puesta en obra varían sensiblemente cuando incorporamos en un hormigón fibras en su masa. Esta variación en la docilidad del hormigón varía según el tipo de fibra y el volumen de éstas que se incorpore. Esto hace necesario que se empleen aditivos que mejoren la reología del hormigón como los superplastificantes y una corrección en la dosificación de los hormigones, con mayor cantidad de finos.

La inclusión de fibras de acero, al ser estas unas inclusiones rígidas incorporadas a la masa del hormigón y con una geometría muy diferente a la de los áridos, reduce la docilidad de la mezcla, que requiere mayor cantidad de finos que un hormigón tradicional pasando de unos porcentajes del 25 al 35 por 100 de pasta

respecto al volumen total, a otros del 35 al 45 por cien dependiendo de la esbeltez y volumen de fibras empleado (4).

Se conocen estudios de fibras de acero, como el realizado por T.S. Nagaraj, en el que se observó como éstas actuaban como “elementos rígidos” con grandes superficies y geometría distinta a la de los áridos, requiriendo para su empleo grandes cantidades de finos que en hormigones normales (23).

La EHE-08 recomienda en su Anejo 14 que la longitud de las fibras ( $l_f$ ) de acero sea como mínimo dos veces el tamaño máximo del árido y menor a dos tercios del diámetro de la tubería de bombeo para su puesta en obra. (1)

Balaguru y Ramakrishnan han estudiado las variaciones en la docilidad de los hormigones con fibras de acero y con fibras de polipropileno, de descenso de cono según la norma descrita en la ASTM C143 (UNE 83313:90), de contenido en aire ASTM C138, C173 C231 y de tiempo Vebe (UNE 83.314) con distintas dosificaciones y contenidos de agua-cemento. Establecen que los contenidos de fibra afectan menos a los resultados obtenidos de docilidad, siendo de los aspectos estudiados el más importante la relación agua-cemento y el contenido de cemento (17).

En los hormigones estudiados con fibra recta de polipropileno se ha producido de igual manera la pérdida de docilidad, a pesar de ser una fibra menos rígida, en las dosificaciones estudiadas en este trabajo. Se ha empleado el cono de Abrams y el consistómetro Vebe según la normativa que lo describe.



*Figura 2.7. Vista de ensayo en laboratorio de descenso de cono de Abrams de hormigón con fibra para el estudio de la consistencia de las distintas series.*



*Figura 2.8. Vista de ensayo realizado en laboratorio de medida de consistencia mediante consistómetro Vebe en hormigón con fibra.*

M.C. Nataraja (24) en sus estudios de hormigones con fibras, empleó el ensayo Vebe para estudiar la trabajabilidad con el mismo. En los ensayos se apreció una pérdida de docilidad de la mezcla, en proporciones de fibra de un 1% en peso, aunque se compactaba fácilmente con un vibrador. Según M.C. Nataraja (24) la trabazón ejercida por las fibras entre sí fue la causa de esta pérdida de docilidad, con resultados peores que los esperados según las deducciones previas por fórmulas convencionales. Es por ello que

no se pueden emplear métodos de dosificación para estos hormigones sin la verificación posterior mediante ensayos.



*Figura 2.9. Imagen de masa de hormigón fresco con microfibras.*

En la realización de las distintas series hemos observado con la fibra se adhiere a la masa cementicia, dando una consistencia más seca, pero interactuando con ella. No se observa apelmazamiento de cantidades de fibra, con una dispersión en la masa es correcta.

#### **2.3.1.6. INVESTIGACIONES RECIENTES DE HORMIGONES CON FIBRAS.**

En general el empleo de las fibras ha sido mayoritariamente en el control de la fisuración, especialmente en edades tempranas del hormigón cuando este posee menores resistencias.

G. Barluenga y F. Hernández-Olivares, estudiaron el control de la fisuración con fibra corta de vidrio en edades tempranas del hormigón, consiguiendo reducciones del área fisurada de hasta un 70% y de la longitud máxima de fisura de hasta un 90% (19).

F. Puertas empleó fibras de polipropileno en hormigones alcalinos, de altas y rápidas resistencias, estudiando la mejora en la durabilidad y resistencias de los

hormigones, consiguiendo aumentos en las resistencias a flexión y una reducción del módulo elástico. Demostró que el refuerzo con fibras es más efectivo en hormigones Pórtland que en alcalinos, debido a que la fibra experimenta en medios alcalinos alteraciones superficiales, especialmente en procesos con altas temperaturas, que afectan a la adherencia con la matriz (25).

M.C. Nataraja, empleó fibras de acero en el aumento de la resistencia del hormigón a impacto, consiguiendo la absorción por parte de las fibras la energía desprendida en el impacto y aumentando la ductilidad del hormigón, sin disminuir la resistencia a compresión del mismo (24).

En Canarias el empleo de fibras ha sido desarrollado por primera vez por G. Melián, ensayando a flexión hormigones con fibras de polipropileno recta de 40 mm de longitud y una esbeltez de 90, realizando hormigones autocompactos con fibra recta de polipropileno de 19 mm de longitud y los denominados ECC (Engineered Cementitious Composite) con mejoras en la tenacidad y comportamiento ante situaciones de sismo y viento con resultados optimistas en cuanto al amortiguamiento del material (13).

Las fibras también son empleadas en la rehabilitación, como demuestra S. Masoud (26), empleándolas con resinas en vigas que han perdido la masa de acero de las barras de refuerzo hasta en un 16 % debido a la corrosión.

Los últimos estudios se dedican a la sinergia de fibras de distinto tamaño y uso o distinto material (27). N. Banthia mejora la dureza en hormigones mediante el empleo conjunto en dosificaciones con fibras de distinto material, empleando fibras de acero y fibras de polipropileno.

F. Hernández-Olivares y otros (28) emplearon fibras de polipropileno en hormigones con caucho para el control de la fisuración por retracción del hormigón, en el diseño de pavimentos rígidos de hormigón con caucho reciclado y su mejora en el comportamiento a la fatiga.

## **2.3.2. HORMIGONES CON ADICIONES PUZOLÁNICAS.**

### **2.3.2.1. HUMO DE SÍLICE.**

El humo de sílice, también denominado micro-sílice, es empleado como material puzolánico en los hormigones para mejorar la permeabilidad, consiguiendo hormigones más resistentes químicamente, como comentamos en apartados anteriores.

Mejora también las resistencias de los hormigones a compresión especialmente y a flexión, consiguiendo ocupar los espacios dejados entre las partículas de cemento y los áridos, debido a su pequeña dimensión, consiguiendo una mayor unión entre componentes. El humo de sílice contribuye a la obtención de hormigones de altas prestaciones, altas resistencias mecánicas y alta durabilidad (4).

Otro uso comercial de este material confiere al hormigón mayor capacidad resistente al impacto, como veremos posteriormente, una mayor dureza superficial, una mayor resistencia a la abrasión del material, incluso como protector de la corrosión según algunos autores y marcas comerciales, al aumentar el ambiente alcalino en el hormigón como base protectora a la combinación de elementos en la carbonatación. Es por ello que se emplee en garajes como pavimento, en columnas de edificios de gran altura, y en estructuras expuestas a condiciones ambientales adversas. (29)

Es resistente también a aguas puras, ácidas y sulfatos como en el caso de otros materiales puzolánicos, usándose esta adición en plantas químicas que empleen ácidos tanto orgánicos como inorgánicos. (58)

#### **2.3.2.1.1. Características.**

El humo de sílice o microsílíce es un subproducto de la manufactura industrial del ferrosilicio y silicio metálico a partir de cuarzo caliza y hierro, en hornos de arco eléctrico a elevadas temperaturas, y posee un color gris. (6)

Se trata de un compuesto mineral formado por partículas esféricas de SiO<sub>2</sub> amorfas y de gran pureza (85-98%) u porciones minoritarias de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cao, MgO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. El tamaño de sus partículas está comprendido entre 0,1 y 0,2 micras presentando una superficie específica aproximada de 20 m<sup>2</sup>/g por adsorción de nitrógeno, y la densidad relativa del humo de sílice es de 2.2 kg/dm<sup>3</sup>. (6)

Para cumplir las exigencias de la EHE-08 su índice de actividad determinado mediante UNE-EN 13263-1 debe ser superior al 100%, una pérdida de calcinación al fuego según la UNE EN 196-2 que debe ser menor al 5%, y una cantidad de cloruros (Cl) menor al 0,10% determinado con la UNE 80217. (1)

La RC-08 exige que la pérdida por calcinación del microsílíce no supere el 4% en masa según la UNE-EN 196-2, empleando un tiempo de calcinación de 1 hora. La superficie específica (BET) del humo de sílice sin tratar será al menos de 15 m<sup>2</sup>/g, conforme la norma ISO 9277. (6)

La calidad de la misma se mide a partir de su índice de actividad, definido como el cociente, expresado en tanto por ciento, entre la resistencia a compresión obtenida sobre probetas normalizadas de mortero, preparadas con un 90% de cemento y un 10% de microsílíce (en masa) y la resistencia a compresión de probetas normalizadas de mortero preparadas solamente con el cemento de referencia, según la norma UNE-EN 13263-1. (1)

En la tesis que se presenta se ha empleado humo de sílice de la marca comercial GRACE, en concreto el Force 10,000 D, con las siguientes características:

Peso específico	2,25 (20°C)
Contenido en sulfatos (SO <sub>3</sub> )	< 1,00%
Contenido en alcalinos (Na <sub>2</sub> O)	< 1,5%
Contenido en cloruros	< 1000 ppm

*Tabla 2.13. Características del microsílíce Grace Force 10,000 D (29).*

<b>Componentes</b>	<b>Microsílice</b>	<b>Cemento</b>
<b>SiO<sub>2</sub> (Sílice)</b>	<b>92 - 98 %</b>	<b>21.3 %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>0.5 %</b>	<b>4.5 %</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>2.1 %</b>	<b>4.0 %</b>
<b>MgO</b>	<b>0.3 %</b>	<b>2.4 %</b>
<b>CaO</b>	<b>0.8 %</b>	<b>63.1 %</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.1%</b>	<b>0.1 %</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>1.0 %</b>	<b>1.2 %</b>
<b>So<sub>3</sub></b>	<b>0.2 %</b>	<b>2.2 %</b>

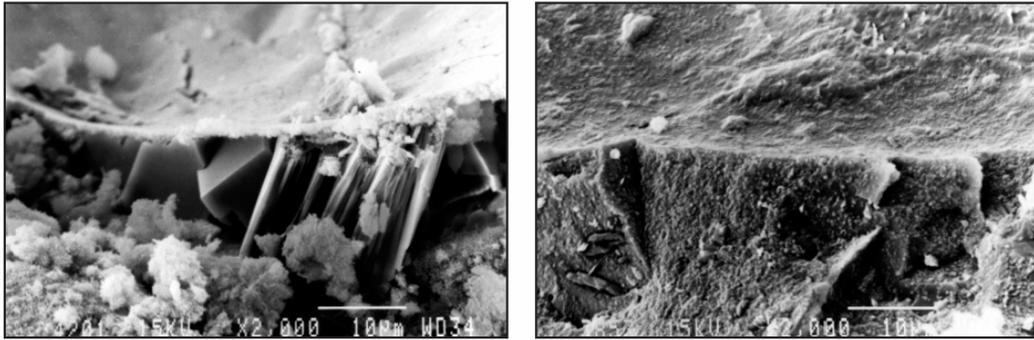
*Tabla 2.14. Análisis Químico del microsíllice en comparación con cemento Portland común con el microsíllice Grace Force 10,000 D (29).*

Los cementos que poseen esta adición son designados con la letra D según la UNE-EN 197-1, pudiendo poseer una proporción en masa de cemento de un mínimo del 6% a un máximo del 10 %, según RC-08 tabla A1.1.1 (6).

#### **2.3.2.1.2. Propiedades.**

El papel del humo de sílice en los hormigones es doble: uno físico al actuar como plastificante como consecuencia de su finura y, otro químico al reaccionar con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento dando lugar a silicatos cálcicos hidratados de composición parecida a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo un aumento de las resistencias mecánicas. Se consigue también un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos, una disminución importante de la permeabilidad de los hormigones al cerrar muchos de los conductos capilares que éste posee, y un aumento de la cohesión de la mezcla.

El empleo como filler es muy interesante en el trabajo que se desarrolla, ya que el aumento de la compacidad es necesario e importante en la consecución de un hormigón impermeable, para conseguir hormigones con gran durabilidad. Consigue rellenar los huecos dejados en la microestructura angulosa y alargada de las partículas del cemento, debido al tamaño hasta cien veces menor y su forma esferoidal.



*Fig.2.10. Imagen microscópica de cemento hidratado con y sin humo de sílice empleado en este trabajo (29).*

Por cada grano de cemento pueden rodearle unos 50.000 granos de humo de sílice. En estas imágenes observamos como los cristales amorfos de la imagen de la izquierda de pasta de cemento han desaparecido y se consigue una masa más homogénea en la imagen de la derecha con humo de sílice.

Mejora además la cohesividad, reduciendo la tendencia a la segregación, dado que sus partículas interrumpen el flujo de agua en los canaliculos que normalmente existen entre las partículas de cemento y los áridos. Estos dos últimos aspectos son los que más inciden en la heterogeneidad en la microestructura de la pasta de cemento hidratada y en especial en la “zona de transición”. Proporciona además numerosos núcleos de precipitación a los productos de hidratación del cemento, debido a su baja reactividad sólida (29).

El uso microsílíce para la disminución de la permeabilidad al agua es efectivo según el porcentaje empleado del mismo, pues se han obtenido reducciones del coeficiente de permeabilidad con porcentajes de un 10% en peso, mientras que con porcentajes de un 20% en peso es ineficaz (30).

El coeficiente de permeabilidad al aire del hormigón con humo de sílice disminuye según se aumenta la cantidad de esta adición. El coeficiente de difusión de cloruros también disminuye con la adición de humo de sílice, siendo la adición de un 10% la más efectiva en la prevención de las barras de acero de la corrosión. Los test

acelerados de permeabilidad a cloruros indican una reducción de hasta una sexta parte de la permeabilidad de cloruros (7).

#### **2.3.2.1.3. Propiedades plásticas del hormigón con humo de sílice.**

La principal característica del hormigón en estado plástico con adición de humo de sílice es la pérdida de docilidad de la masa fresca. La cantidad de finos requieren de una mayor cantidad de agua para el trabajo normal de la masa. Para no aumentar la relación A/C con esta adición es necesario el empleo de superplastificante, que mantenga una docilidad de la masa normal.

El uso del microsílíce potencia el efecto adherente de la masa cementicia al árido. Implica un cambio en la microestructura de la pasta y de la interfase árido-pasta, con unas zonas de transición cuya capacidad resistente y adherente resulta extraordinariamente incrementada.

La adición de humo de sílice en hormigones con fibras mejora el anclaje de las fibras de acero, incrementando el índice de tenacidad de estos hormigones, siendo la sustitución del 20 del cemento por humo de sílice la óptima para este fin. Su empleo en hormigones reforzados con fibra de vidrio reduce la resistencia y dureza de la fibra debido al descenso del pH de la masa que lo envuelve. En hormigones con fibra de carbono la incorporación de humo de sílice mejora la resistencia, la deformabilidad, la resistencia a impacto, impermeabilidad y retracción por secado (7).

#### **2.3.2.1.3. Investigaciones recientes.**

En recientes estudios como el realizado por S.Ouellet (31) se afirma que el aumento de finos en el hormigón produce un aumento en la temperatura durante la hidratación en el fraguado del mismo con mayores retracciones. Se observó además una disminución del tamaño de las partículas formadas con la hidratación adecuada de la masa consiguiendo por tanto hormigones menos permeables.

Otra línea de investigación seguida con este producto es el de conseguir una mejor unión entre los áridos y la pasta de cemento. Así G.V. Guinea et al. (32) emplearon humo de sílice en proporciones de hasta un 5% del peso de cemento con este fin en hormigones con áridos tanto redondeados como de machaqueo, consiguiendo en un 93% de los casos una rotura de los áridos previo a la de la matriz de unión. Estudiando la tenacidad y la mecánica de fractura de esta matriz de unión incluso incorporando resinas a los áridos.

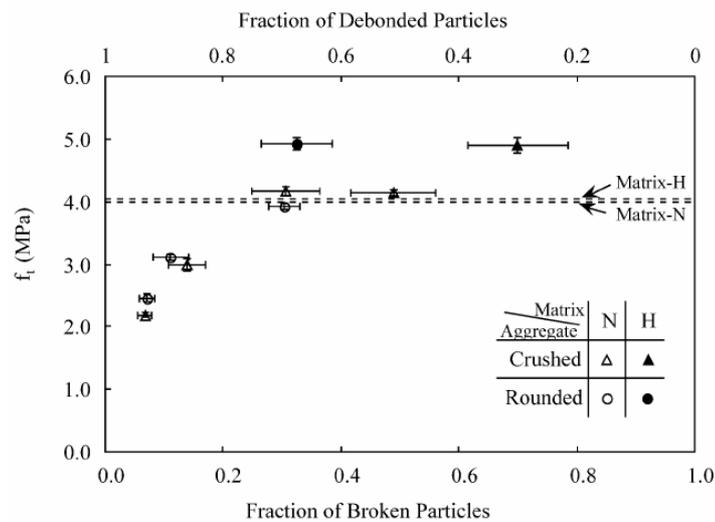


Fig.2.11. Gráfica de variación de la resistencia a tracción del hormigón en relación con la fracción de áridos fisurados (32).

En la tabla presentada se puede observar como con el aumento de las resistencias el área de áridos fisurados aumenta, y es lógicamente inversa a la del área de la matriz de unión.

Podemos por tanto afirmar que en las resistencias del hormigón sin una buena interfase de unión no conseguiremos un hormigón resistente por muy buenas capacidades que posea el árido, mejorando también su resistencia a tracción, y su módulo elástico. El árido de machaqueo consigue, no obstante, un mayor valor de energía en la fractura ( $G_f$ , energía específica de fractura), no teniendo la interfase efecto

notable, debido seguramente a una interrelación que compensa las zonas débiles de la interfase, que no se produce con áridos redondeados (32).

### **2.3.2.2. CENIZAS VOLANTES.**

Las cenizas volantes procedentes de centrales térmicas se encuentran dentro de las adiciones de tipo puzolánico y su empleo en Canarias no es normal, pues su carecemos de centrales de obtención y el coste de transporte hasta nuestra geografía no justifica la sustitución de la misma por la puzolana natural tan abundante en nuestra geología. Se trata de un subproducto industrial desechado antiguamente con los problemas de contaminación que antaño provocaba.

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. (6)

El coste económico de las cenizas volantes es menor que el del humo de sílice, aunque en ambos se valora su capacidad de combinación con el cemento convencional para una reducción del impacto ecológico de las mismas, al no reducir su capacidad portante y resistencias.

#### **2.3.2.2.1. Características.**

Las cenizas volantes pueden ser silíceas (V) o calcáreas (W). La ceniza volante silícea es un polvo fino de partículas esféricas que tiene propiedades puzolánicas. Consta esencialmente de 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 compuestos. La ceniza volante calcárea es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. (6)

Las cenizas volantes pueden ser empleadas como filler, en sustitución del cemento o de los áridos mas finos en hormigones autocompactos con tamaños de partículas menores para una mejor redistribución de la masa.

Producen una activación alcalina, con un mayor entrecruzamiento de las cadenas de CSH (geles de cemento), que se refleja en la mejora de la resistencia a compresión, al igual que con el humo de sílice (33).

Esta activación produce un aumento de la temperatura cuya reacción a temperatura ambiente es baja, pero a temperaturas entre 40 y 85°C, incrementa la reacción notablemente, produciendo morteros que desarrollan en pocas horas grandes resistencias.

La reacción descrita produce un polímero inorgánico de naturaleza amorfa y estructura en tres dimensiones formada por alumino-silicatos hidratados, donde cargas negativas se producen por los iones alcalinos. (34)

Componentes	Cenizas Volantes	Cemento
<b>SiO<sub>2</sub> (Sílice)</b>	<b>49.0 %</b>	<b>21.3 %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>24.6%</b>	<b>4.5 %</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>7.3 %</b>	<b>4.0 %</b>
<b>MgO</b>	<b>1.6 %</b>	<b>2.4 %</b>
<b>CaO</b>	<b>9.1 %</b>	<b>63.1 %</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.2%</b>	<b>0.1 %</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0.6 %</b>	<b>1.2 %</b>
<b>So<sub>3</sub></b>	<b>0.4%</b>	<b>2.2 %</b>

*Tabla 2.15. Análisis químico de las cenizas volantes de la marca comercial Grace “Grace fly ash” en comparación con cemento Pórtland común (34).*

#### **2.3.2.2.2 Propiedades plásticas del hormigón con cenizas volantes.**

Las cenizas volantes reducen la capacidad de trabajo con el hormigón fresco. Es por ello que requieran también un aumento de la relación agua/cemento o empleo de superplastificante o superfluidificantes.

En la tesis desarrollada a continuación no se han desarrollado muestras con este material, aunque presentaremos algunas de las investigaciones más recientes.

#### **2.3.2.3. Investigaciones recientes.**

El empleo de las cenizas volantes ha sido desarrollado en Canarias por G. Melián, en el estudio de autocompactables con y sin fibras de polipropileno (13). Así como por R. Santana (12) que estudia las propiedades y características de los mismos.

S. Ouellet (31), estudió el efecto de las cenizas volantes en la mejora de la porosidad de la pasta de cemento hidratada, consiguiendo la reducción de tamaño de los poros de la red capilar que conformaba la masa en el proceso de curado. No se apreciaron efectos negativos ni positivos de la sustitución de cemento por cenizas volantes. Puede disminuir los costes de producción de cemento y una menor emisión de CO<sub>2</sub> en su producción. Al igual que con el humo de sílice se observó un aumento de la temperatura.

F. Puertas (25) estudió la retracción de los morteros con cenizas volantes y con humo de sílice observando que los más estables volumétricamente eran aquellos con cenizas volantes con prácticamente valores nulos. Estudió también el control de la fisuración mediante el empleo de fibras de polipropileno, observando una mejoría también a flexión con este refuerzo. La estabilidad de estos morteros con cenizas volantes ante ciclos de congelación/descongelación fue muy buena consiguiendo mejores resistencias.

### **2.3.3. LOS REDUCTORES DE AGUA EN EL HORMIGÓN.**

El deseo de unas mejoras en las capacidades mecánicas y de propiedades del hormigón implica el conseguir como veremos en estudios posteriores una reducida relación de agua/cemento sin perjudicar la docilidad de la mezcla para su puesta en obra.

La primera mención conocida del uso de pequeñas cantidades de materiales orgánicos para la mejora de la fluidez de una dosificación con cemento data de los años treinta en Estados Unidos, empleándose entre los años treinta y cuarenta lignosulfatos. Posteriormente en los años cincuenta se comercializaron componentes hidróxidos, hasta hoy día con una gran variedad de compuestos químicos en el mercado.

Los granos de cemento son extremadamente angulosos, con una forma no favorable para un buen contacto con el agua. Además cuando los granos de cemento entran en contacto con el agua tienden a formar flóculos o apelmazarse. Los agentes reductores de agua se unen a la superficie de los iones de calcio o de aluminio de los granos de cemento, consiguiendo mediante sus grupos funcionales de carboxilos, sulfonatos o de hidróxidos atraer las moléculas de agua, con la formación de vainas de moléculas de agua asociadas entre sí (7).

Para conseguir mantener una trabajabilidad del hormigón fresco con menor cantidad de agua es necesario emplear un elemento que sirva de lubricante entre los componentes que conforman su masa, de ahí viene el uso de los plastificantes y superplastificantes, siendo actualmente de mayor uso los superplastificantes. La EHE-08 distingue entre los reductores de agua o plastificantes y los reductores de agua de alta actividad o superplastificantes, como dos de los cinco tipos de aditivos que considera en los hormigones. Deben de cumplir la UNE EN 934-2. (1)

### **2.3.3.1. SUPERPLASTIFICANTES.**

#### **2.3.3.1.1. Características de los superplastificantes.**

Los superplastificantes son muy similares a los plastificantes convencionales en muchos aspectos, pero difieren principalmente en que solo producen efectos negativos en grandes dosis. Su utilización comercial comienza en los años sesenta en Japón (7).

Están formados por grandes moléculas poliméricas, son esqueletos rígidos formados por sulfonatos que se absorben sobre el aluminio en el calcio en las partículas de cemento. Poseen enlaces menos fuertes que los carboxílicos o hidroxilos por lo que no retardan el tiempo de fraguado.

Los superplastificantes no actúan significativamente sobre la tensión superficial del agua y no tienden a introducir agua, incluso en grandes dosis.

#### **2.3.3.1.2. Tipos de superplastificantes.**

La clasificación de los superplastificantes se hace en cuatro categorías diferenciadas que son las categorías A, B, C Y D.

Categoría A.- policondensados sulfonados de melanina-formaldehído. Poseen un peso molecular de 20.000 en una estructura en cadenas que se repite unas sesenta veces, con el grupo sulfonado adjunto a anillo rígido de melamina dejándolo libre de los ejes de la principal cadena polimérica. Esta categoría de superplastificantes se acercan más al ideal al tener poco efecto en la puesta, incluso en grandes dosificaciones y no poseen ninguna tendencia a la entrada de aire.

Categoría B.- policondensado sulfonados de naftaleno-formaldehído. Poseen un peso molecular de 2.000 con estructuras que se repiten 5-10 veces. Poseen un efecto importante sobre la tensión superficial. Los polímeros de última generación deben mejorar aumentando la longitud de las cadenas que los conforman, aunque la viscosidad de las mismas reducirá el factor n de repetición de las mismas. Permiten una

mayor trabajabilidad que los del tipo A, tendiendo a ser más eficientes en términos de dosificación, pero dan algún problema de puesta en obra por disgregación.

Categoría C.- lignosulfonatos modificados. Los lignosulfonatos son macromoléculas de complicada estructura. Los lignosulfonatos sin refinar poseen una distribución de tamaños moleculares que abarcan un gran espectro de pesos moleculares. Los lignosulfonatos de medio peso molecular poseen una mayor tendencia a la entrada de aire en dosis altas que en bajas dosis. Los de menor peso molecular tienden a retrasar el curado del hormigón, debido a las pentosas residuales de azúcar que no han fermentado. Los lignosulfonatos de alto peso molecular poseen muchas posibilidades, como plastificantes muy eficientes en pequeñas dosis.

Existen lignosulfonatos refinados mediante técnicas como la ultrafiltración, que los hace más eficaces, aunque no llegan al nivel de los superplastificantes de las categorías A o B.

Categoría D.- polímeros hidroxilados: copolímeros ácido acrílico/ácido hidroxipropilmetacrílico. Esta categoría fue incluida en los años setenta, y los superplastificantes basados en estos copolímeros son empleados en pilotaje, en casos que requieran la retención de buena trabajabilidad.

#### **2.3.3.1.3. Ventajas de los superplastificantes.**

Los superplastificantes aumentan en gran medida la trabajabilidad del hormigón, creando hormigones fluidos y hormigones con grandes resistencias iniciales reduciendo considerablemente el agua.

El hormigón fluido debe de poseer una gran trabajabilidad manteniendo las prestaciones de uno de consistencia más seca, evitando la segregación del mismo. Por otro lado en los hormigones de altas resistencias, los superplastificantes consiguen reducir el agua de amasado un veinticinco por ciento, requiriendo para ello una relación de superplastificante alta que aumenta los costes de estos. Es se empleen para alcanzar resistencias altas los primeros días.

## 2.4. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS CANARIOS

### 2.4.1. Propiedades físicas.

#### 2.4.1.1. Mecánicas (compresión, tracción, flexión).

##### 2.4.1.1.1. Introducción.

El hormigón es un material resistente ante cargas axiales de compresión, pero con valores a tracción muy bajos. En las secciones sometidas a compresión simple o compuesta, las armaduras, principales en compresión deben cumplir las limitaciones siguientes (1):

$$\begin{array}{ll} A'_{s1} f_{yc,d} \geq 0,05 N_d & A'_{s1} f_{yc,d} \leq 0,5 f_{cd} A_c \\ A'_{s2} f_{yc,d} \geq 0,05 N_d & A'_{s2} f_{yc,d} \leq 0,5 f_{cd} A_c \end{array}$$

donde:

$f_{yc,d}$  Resistencia de cálculo del acero a compresión  $f_{yc,d} = f_{yd} > / 400 \text{ N/mm}^2$ .

$N_d$  Esfuerzo actuante normal mayorado de compresión.

$f_{cd}$  Resistencia de cálculo del hormigón en compresión.

$A_c$  Área de la sección total de hormigón.

*Fig 2.12 . Limitaciones de las armaduras en piezas sometidas a compresión simple o compuesta. (1)*

El uso en edificación e ingeniería civil de cualquier material con capacidad portante o estructural, nunca lleva cargas axiales puras a compresión, ya que por condicionantes del propio estado de cargas o por premisas de cálculo según normativa, siempre se consideran estados de desequilibrio de cargas mínimos.

En el cálculo de elementos a compresión, tales como pilares, se considera siempre un desplazamiento mínimo de la carga vertical, denominado excentricidad, mayor a  $H/20$  y 2 cm. Dicha excentricidad debe ser contada a partir del centro de

gravidad de la sección bruta y en la dirección más desfavorable de las direcciones principales y sólo en una de ellas, según EHE-08. En cualquier caso en un edificio actúan cargas verticales y horizontales, produciendo también esfuerzos a cortante en las barras. (1)

Es por ello que el uso del hormigón en masa está muy limitado, siendo el hormigón armado, como veremos más adelante, reforzado con barras de acero, de uso muy extendido. En piezas sometidas a tracción simple o compuesta con dos armaduras principales se cumplirán las siguientes limitaciones según la EHE-08:

$$A_p f_{pd} + A_s f_{yd} \geq P + A_c f_{ct,m}$$

donde:

$A_p$  Área de la armadura activa adherente.

$A_s$  Área de la armadura pasiva.

$f_{pd}$  Resistencia de cálculo del acero de la armadura activa adherente en tracción.

$f_{yd}$  Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción.

$f_{ct,m}$  Resistencia media a flexotracción del hormigón.

$P$  Fuerza de pretensado descontando las pérdidas instantáneas.

$A_c$  Área de la sección total de hormigón.

*For. 2.3. Limitaciones en piezas con dos armaduras principales sometidas a tracción simple o compuesta. (1)*

La capacidad a tracción de los hormigones mejora en aquellos de baja relación agua/cemento. También el tamaño del árido influye en este aspecto, pues al aumentar su tamaño, existe una menor cantidad de mezcla o ligante que resista ante la fisuración, y su comportamiento será peor.

En piezas que trabajen a flexión se producirán zonas a compresión y zonas a tracción, que incluso en la misma barra y dependiendo de las coacciones, cambian de a lo largo de la misma de valor. En todos aquellos casos en los que el agotamiento de una sección se produzca por flexión simple o compuesta, la armadura resistente longitudinal traccionada deberá cumplir la siguiente limitación (1):

$$A_p f_{pd} \frac{d_p}{d_s} + A_s f_{yd} \geq \frac{W_1}{z} f_{ct,m,f} + \frac{P}{z} \left( \frac{W_1}{A} + e \right)$$

donde:

$A_p$  Área de la armadura activa adherente.

$A_s$  Área de la armadura pasiva.

$f_{pd}$  Resistencia de cálculo del acero de la armadura activa adherente en tracción.

$f_{yd}$  Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción.

$f_{ct,m,f}$  Resistencia media a flexotracción del hormigón.

$W_1$  Módulo resistente de la sección bruta relativo a la fibra más traccionada.

$d_p$  Profundidad de la armadura activa desde la fibra más comprimida de la sección.

$d_s$  Profundidad de la armadura pasiva desde la fibra más comprimida de la sección.

P Fuerza de pretensado descontadas las pérdidas instantáneas.

A Área de la sección bruta de hormigón.

e Excentricidad del pretensado respecto del centro de gravedad de la sección bruta.

z Brazo mecánico de la sección. A falta de cálculos más precisos puede adoptarse  $z = 0,8 h$ .

*For. 2.4. Limitación a la armadura longitudinal traccionada en secciones a flexión simple o compuesta (1)*

Un hormigón poco resistente posee una relación entre tensión a tracción y a compresión mayor que uno de gran resistencia, pues la relación o radio tensión/compresión disminuye al aumentar la resistencia a compresión. Ésta relación (35) baja con la edad, pues la resistencia a tracción se mantiene y aumenta la capacidad a compresión. S. Swaddiwudhipong estableció estas relaciones también en hormigones con adiciones, estableciendo que en hormigones con cenizas volantes la relación tracción/compresión es más estable.

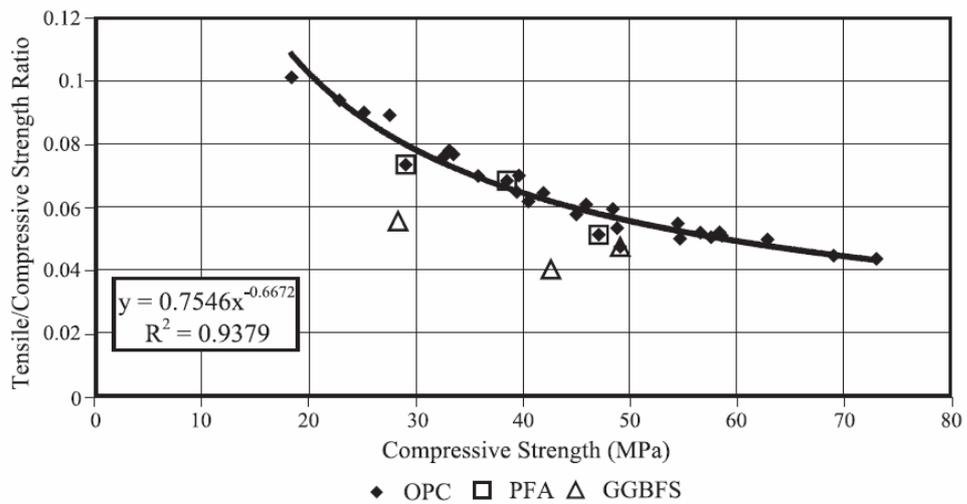


Fig. 2.13. Variación de la relación tracción/compresión en relación con el valor de compresión del material (34).

#### 2.4.1.1.2. Investigaciones recientes.

G.V. Guinea (32) investigó la unión en materiales de base cementicia de la matriz con los áridos, fueran de machaqueo o redondeados, mediante la rotura de materiales, y la transmisión de tensiones desde las caras abiertas de la fisura a la unión de ambas caras, considerando mediante ecuaciones la resistencia de un material. A medida que la fisura se abre la resistencia del material disminuye, hasta llegar a un punto crítico donde desaparece la cohesión del material, denominado “fisura verdadera”.

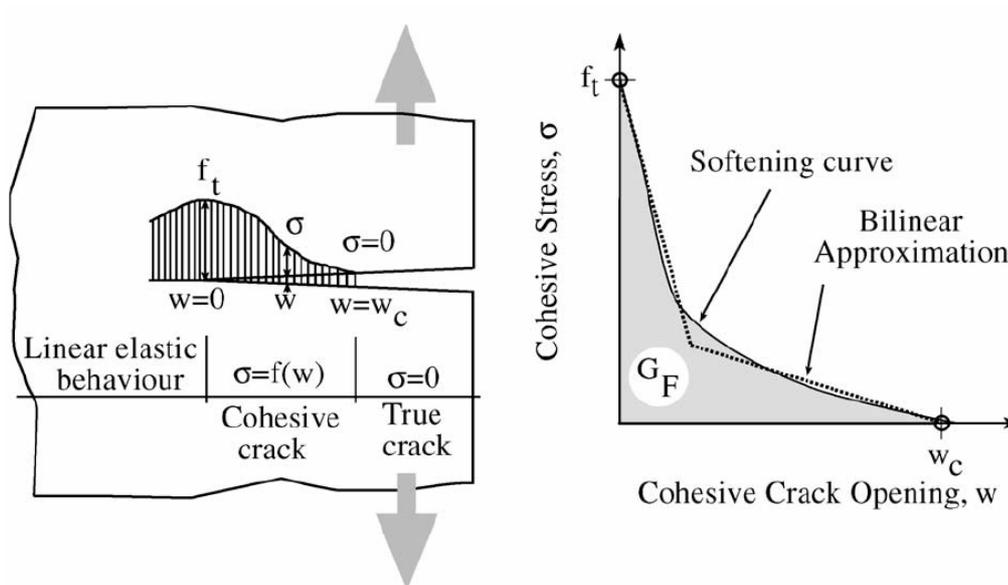


Fig. 2.14. Esquema de rotura de fisura y curva de aproximación según G. Guinea.(32)

El trabajo empleado para producir una unidad de área de fisura verdadera es la energía de fractura específica ( $G_f$ ), que coincide con el área bajo la curva de cálculo. Tanto la energía de fractura, como la resistencia, así como la apertura crítica de fisura, y la función de cálculo, son propiedades del material macroscópico, y por lo tanto son dependientes de la estructura interna del hormigón (32).

El estudio de materiales a flexión con empleo de refuerzos distintos al de barras de acero, ha sido desarrollado por G. Melián en Canarias, con fibras rectas de polipropileno de diámetro mayor a 0,30 mm. Consiguió piezas de hormigón armado estructural sin acero, que aumentaron su capacidad a flexión y su tenacidad, con un comportamiento dúctil del hormigón (13).

N. Banthia (27), consiguió la mejora de las capacidades resistentes de hormigones a flexión con fibras de acero, consiguiendo también un aumento de la tenacidad y resistencia a tracción del hormigón.

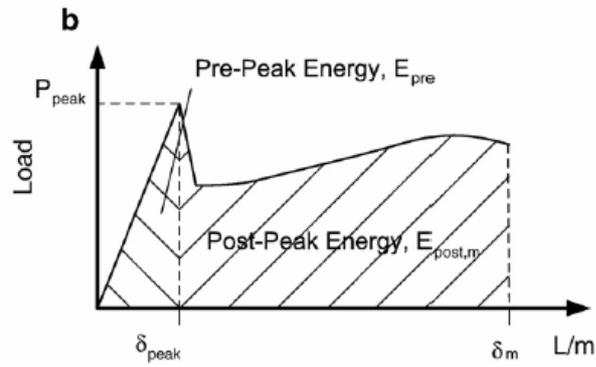


Fig. 2.15. Gráfica esquemática de rotura de material tenáz (27).

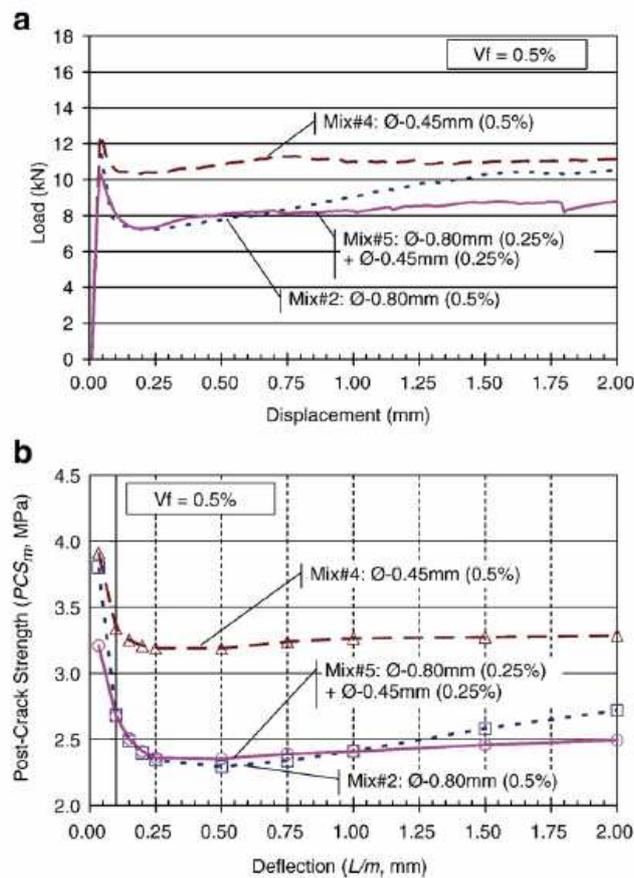


fig. 2.16. Gráficas de resultados obtenidos por N. Banthia de materiales a flexión. En la gráfica superior podemos ver como después de una primera rotura el material continúa trabajando. En la segunda se estudia la flecha en milímetros del material después del pico de rotura máximo (27).

Para la mejora de las capacidades mecánicas de un hormigón se pueden emplear distintas fibras, variando su tamaño o material y su fin específico. Es lo que se conoce por sinergia de materiales, en los que se consiguen mejoras de las capacidades primeras para las que los materiales eran empleados por sí solos. N. Banthia propuso híbridos basados en la dimensión de las fibras y del fin para el que eran empleadas. (27)

#### **2.4.1.2. RESISTENCIA A IMPACTO.**

##### **2.4.1.2.1. Introducción.**

El hormigón como material resistente a cargas estáticas, bien sean constantes o sean cíclicas, es muy usual y posee normativa que lo regula. En el caso de resistencia a impacto de hormigones las referencias en este campo son menos comunes. El hormigón en masa es un material frágil que ante impactos se fisura excesivamente y rompe fácilmente.

Su empleo como material en elementos que pueden recibir impactos como las barreras de autopista es meramente económico. No se le ha adaptado para ser un material capaz de absorber correctamente la energía y disiparla.

Este material también ha sido empleado en puentes de ríos o de estrechos en mares que sufren heladas en invierno, y donde el paso del hielo o materiales arrastrados pueden deteriorarlo seriamente. En su lugar normalmente es material protegido a su vez por chapas de acero, material más dúctil y más resistente.

El aspecto más positivo que posee el hormigón es el de adaptarse a casi cualquier forma de manera sencilla y sin mano de obra muy especializada. Es por ello que mantenga su uso mediante el correcto diseño de las formas de los elementos que se exponen al golpeo con elementos móviles, siempre que su dirección y fuerza sean previstas.

En este trabajo se estudia la resistencia a impacto de los hormigones con fibras y con humo de sílice como aspecto añadido en su optimización del empleo de estos en suelos industriales y barreras de autopista.

#### **2.4.1.2.2. Problemática en Canarias.**

En Canarias el uso del hormigón para impacto es limitado, al no poseer agentes meteorológicos extremos que generen el movimiento de objetos con el peligro que su golpeo produce.

En elementos de ingeniería podemos emplearlo en barreras de autopista, así como en los diques de los puertos. Lógicamente será en estos lugares de movimiento de vehículos donde un accidental descuido puede producir daños, no tanto al hormigón, como a los conductores de los mismos.

#### **2.4.1.2.3. Investigaciones recientes.**

A nivel nacional pocos son los estudios sobre este aspecto, podemos destacar el realizado por F. Hernández-Olivares y G. Barluenga, en el empleo de caucho reciclado en firmes de autopista, estudiando la disipación de energía del material con y sin caucho en cargas dinámicas. Establecieron una cantidad óptima de fibra de goma para la estabilidad y compatibilidad de la interfase del cemento y la goma, así como la disipación de la energía dinámica y su mejor capacidad a impacto (28).

A nivel internacional destacar también el trabajo de M.C. Nataraja, en el estudio de la mejora de la capacidad a impacto del hormigón reforzado con fibra de acero. El empleo de la fibra juega en este estudio el papel de absorber la energía y hacerlo un material más dúctil sin disminuir la resistencia a compresión del material. Los ensayos fueron realizados mediante una polea para recoger una carga de 4,5 kg. que era lanzada a una altura desde un soporte vertical, estudiando el momento de la primera fisura y de la última rotura, la fibra empleada era de acero (24).

En los hormigones con fibras se consiguió aumentar la resistencia última de rotura a impacto entre un 40-60%, según la proporción de fibras. La primera rotura aumento en algunos casos hasta 25 veces el valor de partida (24).

### **2.4.1.3. FISURACIÓN.**

#### **2.4.1.3.1. Introducción.**

La fisuración en los hormigones se produce debido a la existencia tensiones a tracción que superan la resistencia del material. El origen de estas tensiones es diverso. Desde tensiones producidas en la transformación de estado plástico a sólido del hormigón –retracción en sus diversas modalidades que veremos posteriormente-, a tensiones producidas durante su vida útil –tensiones de trabajo o ambientales-, a movimientos generados en el interior del hormigón o a expansión del material embebido en el hormigón.

La fisuración es, por tanto, el resultado de la combinación de zonas de tensión y de relajación en el cambio volumétrico del hormigón.

La fisuración y su control en el tiempo es muy importante ya que pueden representar un punto de entrada de elementos externos al hormigón y modificar su estado en las caras abiertas de la fisura. Representan en hormigones armados un riesgo para la corrosión de la armadura, así como un defecto estético e incluso un riesgo psicológico, con sensación de rotura última de la pieza.

La EHE-08 establece un estado límite por fisuración en hormigones endurecidos expuestos a tensiones debidas al trabajo mecánico al que son sometidas durante su vida útil. Distingue dentro de las fisuras las debidas a sollicitaciones normales, por cortante y torsión. Dentro de las debidas a las sollicitaciones normales distingue las debidas a compresión, descompresión y tracción. (1)

#### **2.4.1.3.1.1. Tipos de fisura.**

Podemos distinguir las fisuras según el momento en que se producen, antes o después de endurecido el hormigón.

##### **2.4.1.3.1.1.1. Fisuras previas al endurecimiento.**

La fisuración producida en esta etapa del hormigón se puede producir por la propia formación del mismo en su fraguado y proceso de endurecimiento o por agentes externos.

Podemos diferenciar entre las producidas por heladas durante la formación del hormigón, las de asentamiento plástico y retracción plástica (capítulo 2.4.1.4) y las de movimientos de los encofrados o de la sujeción de la base que los soporta.

##### **2.4.1.3.1.1.2. Fisuras posteriores al endurecimiento**

Las fisuras posteriores al endurecimiento se producen por agentes externos al propio hormigón, bien sean agentes químicos, físicos, térmicos o mecánicos.

Dentro de las fisuras producidas por agentes químicos podemos destacar los procesos de corrosión del acero (capítulo 2.5), reacción árido-álcalis, agentes orgánicos, ataque de por ácidos...

Las fisuras de aspecto físico se pueden producir por el ahogado del hormigón en tiempos calurosos o de curado ineficaz, que los áridos posean retracción o alta absorción de agua, o por retracción hidráulica (capítulo 2.4.1.4).

La temperatura produce diversos tipos de fisuración, por retracción térmica interna (capítulo 2.4.1.4), variaciones de la temperatura a lo largo de una jornada o de una estación a otra, y por ciclos de hielo y deshielo.

Las fisuras estructurales son las propias para las que se ha dispuesto una pieza, con aberturas máximas de las mismas establecidas en la EHE-08. Este tipo de

fisuración es implícito al trabajo del hormigón, su cantidad, forma y longitud nos puede indicar el exceso de carga de un material superior a la de diseño inicial. (1)

Una vez la fisura se produce su propagación se puede producir incluso con una menor tensión en el material. Una fisura en propagación incrementa la tensión a todo plano no figurado. (32)

En el estudio realizado de barreras por el Instituto de Michigan se comprobó que la base fisurada de la barrera de autopistas causa fisuras de 0.2 a 0.3 veces el tamaño de su sección, en este punto la fisura se puede propagar libremente por toda la sección sin ninguna carga debido al desequilibrio de cargas entre la zona fisurada y sin fisurar de la sección (36).

La superficie expuesta del elemento por el volumen del elemento expuesto afecta a la magnitud de la retracción, con una menor o mayor pérdida de calor de hidratación según esta relación (36).

#### **2.4.1.3.1.2. Métodos de estimación de la fisuración.**

Para la determinación de la fisuración de origen mecánico la EHE-08 establece según el tipo de sollicitación una formulación para su cálculo. En todas las situaciones persistentes y en las situaciones transitorias bajo la combinación más desfavorable de acciones correspondiente a la fase en estudio, las tensiones de compresión en el hormigón deben cumplir:

$$\sigma_c \leq 0,60 f_{ck,j}$$

donde:

$\sigma_c$  Tensión de compresión del hormigón en la situación de comprobación.

$f_{ck,j}$  Valor supuesto en el proyecto para la resistencia característica a j días (edad del hormigón en la fase considerada).

*Fig. 2.17. Comprobación de límite de fisuración por sollicitaciones a compresión en piezas de hormigón armado. (1)*

La comprobación general del Estado Límite de Fisuración por tracción consiste en satisfacer la siguiente inecuación:

$$W_k \leq W_{\max}$$

donde:

$w_k$  Abertura característica de fisura.

$w_{\max}$  Abertura máxima de fisura definida en la tabla 5.1.1.2 (EHE-08).

*Fig. 2.18. Comprobación de límite de fisuración por solicitaciones a tracción en piezas de hormigón armado. (1)*

La fisuración por efecto de la retracción se detalla en esta tesis en el capítulo 2.4.1.4. Los métodos de estimación de la fisuración por efecto de la retracción están en su mayoría basados en los modelos ACI 209 y CEB-FIP, del American Concrete Institute y del Comité Euro-internacional del Hormigón y Federación Internacional del Pretensado respectivamente. Otros derivan de éstos, incorporando nuevos parámetros y modificaciones. Estos métodos estudian la fisuración producida por la retracción según distintos procedimientos de curado. Por lo tanto las fórmulas matemáticas son similares. (36)

Cada modelo posee un valor último de retracción que predice el total de retracción según la resistencia del material y del tipo de cemento.

La retracción en función del tiempo se basa en el proceso de fraguado del hormigón comenzando desde su colocación, parando este proceso siempre cuando la humedad relativa llega al 100%. También se tiene en cuenta la forma de los materiales según la superficie expuesta del mismo. La humedad relativa se toma de la media existente en el ambiente al que se expone (36).

$$\varepsilon_{sh}(t) = \left[ \frac{(t - t_c)}{35 + (t - t_c)} \right] \cdot \varepsilon_{shu}$$

*Fig. 2.19. Fórmula ACI 209 donde  $t$  es la edad del hormigón a la que se quiere predecir la retracción del hormigón,  $t_c$  es la edad de comienzo del curado del hormigón, y  $\varepsilon_{shu}$  es la retracción última (36).*

#### **2.4.1.3.1.3. Defectos constructivos.**

El factor que más reduce la vida del hormigón es el defecto constructivo durante su colocación y curado. Errores en la selección del material, prácticas constructivas poco acertadas y falta de mantenimiento de los elementos de hormigón son determinantes en la vida útil de las estructuras.

La falta de agua de curado o el tiempo en que se tarda en aplicar agua de curado al hormigón produce daños patológicos importantes e irreversibles, produciéndose desde las primeras horas este tipo de defecto constructivo, especialmente en los hormigones puzolánicos (10).

El resto de las malas prácticas que provocan fisuración son aquellas por falta de previsión en proyecto, bien por la mala elección del material, mala disposición de los elementos en la construcción, cargas excesivas no planteadas en cálculo o mal uso por parte de los usuarios (15).

Existe también una influencia de posición que ocupen las barras de acero en la pieza de hormigón. Durante el vertido debido a la segregación del hormigón y al ascenso de agua alrededor de las barras se produce un hormigón poroso con peor unión. Es por ello que por ejemplo una barra que ocupe la base de un elemento de hormigón esté rodeado de un hormigón de mejor calidad que una barra situada en la zona superior de la pieza. La EHE (1) determina posición I y II en los hormigones según este aspecto, diferenciando la longitudes de anclaje y de solape de las varadse refuerzo de acero.

En hormigones que deben ser desmoldados rápidamente se emplean hormigones de consistencia seca, que fisuran antes al perder más fácilmente el agua de fraguado, como en las barreras de autopista. Estas barreras son realizadas generalmente con un encofrado deslizante, que mediante una máquina vibra a su vez el hormigón inmediatamente después de su vertido. El hormigón es repasado manualmente y protegido con un spray con un compuesto para el curado, aunque posteriormente no se le practica ningún curado o cuidado añadido. En estos elementos podemos por tanto encontrar numerosas patologías (36).

#### **2.4.1.3.2. Problemática en Canarias.**

En Canarias la fisuración se presenta como un punto a resolver en determinadas localizaciones, en especial las de costa. El cemento empleado en Canarias está adicionado con puzolanas que como se ha indicado requieren de un curado más cuidadoso especialmente en las primeras horas, para evitar la aparición de fisuras por retracción y disminución de resistencias. (10)

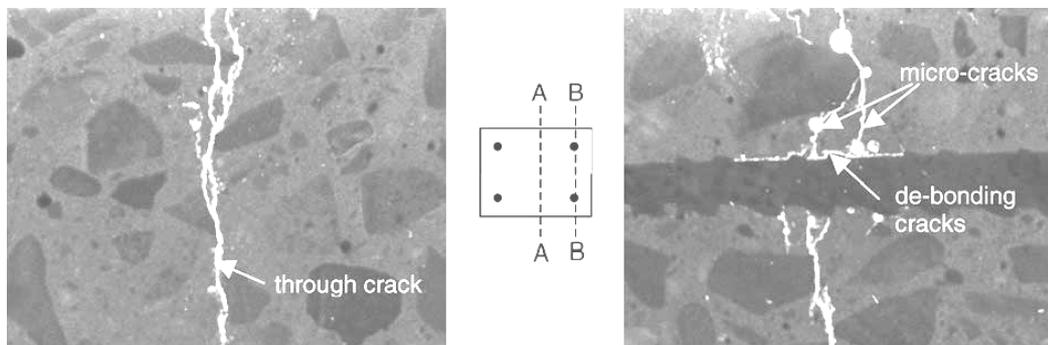
Existen posibilidades de reparar fisuras con resinas o con siliconas, o incluso que se produzca un autocurado en algunas de pequeño tamaño no expuestas a la lluvia por efecto de la propia suciedad y de la contaminación llegando a sellarse. Este primer planteamiento surge en aquellos casos en el que a pesar de un curado intenso se han producido patologías que puedan afectar a la vida útil del elemento. Estos métodos de sellado son costosos y poco efectivos si no se protegen y se lleva un mantenimiento posterior, pues con el tiempo se despegan del soporte e incluso se desintegran por efecto del sol. (37)

#### **2.4.1.3.3. Investigaciones recientes.**

El control de la fisuración del hormigón ha sido complementado en los hormigones armados disponiendo armaduras de piel en vigas, en capas de compresión en los forjados y en zonas superficiales de elementos de gran masa como zapatas. Todas estas armaduras por lo tanto para controlar la fisuración superficial de los

elemento de hormigón se han dispuesto cercanas a la superficie. El problema es que estas barras de piel han sido fáciles de atacar por corrosión, debido a su exposición cercana al medio ambiente. El armado dispuesto no consigue controlar la aparición de las fisuras o su cantidad, aunque si consigue disminuir su ancho. (1)

M. Sule (38) estudió el efecto del armado en la fisuración temprana debida a la retracción autógena y a los efectos térmicos. Estableció que los hormigones con gran cantidad de armado tienen menos riesgo de fisurar que los hormigones en masa, permitiendo al hormigón posponer su resistencia necesaria para resistir el esfuerzo de tracción por variación volumétrica.



*Fig.2.20. Imagen esquemática de rotura de pieza de hormigón en la zona sin refuerzo (A) y con refuerzo (B) en espécimen de M. Sule. En la zona cercanas a las barras las fisuras son de menor tamaño que las de la zona sin armado. La formación de estas pequeñas fisuras aumentan la capacidad resistente del hormigón, antes de la aparición de la fisura transversal de la foto de la derecha (38).*

G. Barluenga y F. Hernández-Olivares, estudiaron el control de la fisuración a edades tempranas de hormigones incorporando fibras de vidrio. Estudiando los porcentajes de fibra a emplear vieron como con porcentajes excesivos de fibra se producía una fisura paralela a la misma, cuando lo normal es la colaboración en una fisura perpendicular a la misma por parte de la fibra. (19)

Ésta fisura paralela produce una vía de progresión sencilla de la fisura, produciendo desunión entre la fibra y la matriz. El aporte de unos 600 g/m<sup>3</sup> de fibra por

hormigón consigue un control efectivo de la fisuración, con una reducción del área fisurada y de la longitud máxima de fisura.

Y. Xu estudió en el control de la fisuración a altas temperaturas (thermal spalling), en pastas de cemento con y sin fibras, observando una mejoría en la “densidad de fisuración” al incorporar fibras en el hormigón, especialmente a partir de los 450°C.

Una fisuración excesiva produce una clara pérdida de la resistencia del cemento, como demostró Xu, con pérdidas de capacidad a tracción de hasta un 65 % en morteros sometidos a 450°C. El ratio de deterioro es mayor en hormigones con relaciones de agua/cemento bajas que con mayores relaciones. (21)

Una vía de estudio de la fisuración de una pieza de hormigón es la del empleo de los ultrasonidos, desarrollada por H. Qasrawi (39), pues las discontinuidades en el hormigón mediante huecos y fisuras producen una ralentización de las ondas que se transmiten mejor por el material (cuanto más denso mejor). El estudio se realizó en probetas de hormigón que fueron medidas antes y después de ser sometidas a cargas hasta un 85% de su resistencia máxima a compresión ( $f_{cu}$ ), observando una disminución de la velocidad de ultrasonido hasta un 94% de su valor con anchos de fisuras de 5.2 a 6.8 mm. Este método es muy útil en rehabilitación de hormigones en edificios.

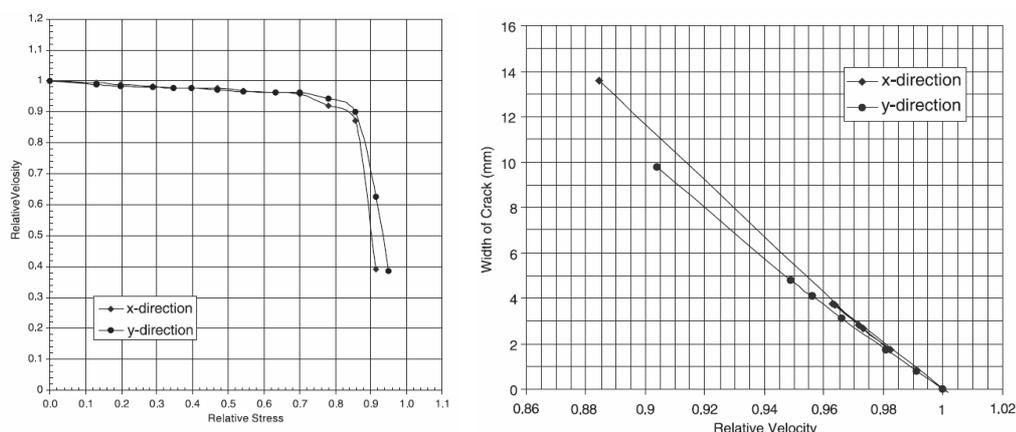


Fig.2.21. Gráficas obtenidas de los estudios realizados por H.Y. Qasrawi estudia como con el porcentaje de estrés al que se someta la pieza se produce una

*bajada de la velocidad relativa a ultrasonidos del hormigón. En la segunda como el ancho de fisura influye en la velocidad de ultrasonidos (39).*

#### **2.4.1.4. RETRACCIÓN.**

La retracción es el primer cambio volumétrico del hormigón en su transformación a sólido desde su fase líquida. El estudio de este fenómeno es importante, pues este proceso de cambio nos puede indicar y predecir la estabilidad final del hormigón y durante su vida útil. El control de este parámetro influirá en otros que están relacionados con la durabilidad del material y de los refuerzos de acero en hormigones armados.

##### **2.4.1.4.1. Introducción.**

Los cambios volumétricos que puede sufrir un hormigón se deben principalmente a cambios de temperatura y de contenido de la humedad. Cuando un material es coaccionado ante un movimiento por un cambio volumétrico, se desarrollan una serie de tensiones que en etapas tempranas donde el hormigón no posee resistencia a la rotura se fragmenta y fisura.

Las tensiones en el hormigón joven se pueden producir por tres razones: por retracción autógena, retracción por secado y/o retracción térmica, existiendo otro tipo de retracción por fluencia.

La retracción autógena es la reducción del volumen en el conjunto de la pieza de hormigón causada por la hidratación del cemento durante el endurecimiento del mismo en el cambio de materiales sufrido por el cemento. Este proceso está asociado al cambio volumétrico, estrictamente del material y de los compuestos, derivado de la solidificación del material. Podemos decir de esta manera que la composición del material resultante es de menor tamaño que previo a la unión del cemento con el agua por separados. (40)

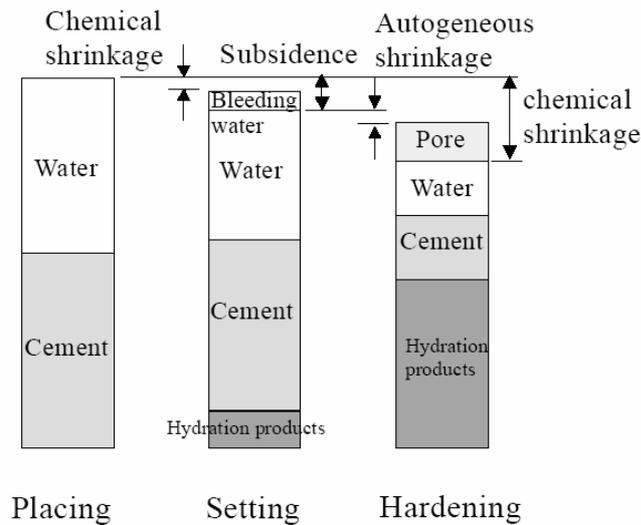


Fig.2.22. Esquema que representa la retracción autógena (s. JCI 2002).

El proceso de retracción autógena sólo es significativo o notable en aquellos morteros o hormigones de cemento con relaciones a/c muy bajos, en torno a 0,3-0,4 (Hirozo Mihashi) (40); pues en valores de a/c mayores toma más importancia la retracción por secado.

La retracción por secado, como su nombre indica es la producida por la evaporación del agua de fraguado durante el proceso de endurecimiento y curado. Esta migración se produce por el gradiente de diferencia de humedad entre el ambiente que rodea la pieza y la propia del hormigón, que aumenta en combinación con la temperatura y el viento.

Los procesos de retracción autógena y por secado se producen simultáneamente, y es difícil separarlos y determinar el porcentaje de deformación que se debe a cada cual, no obstante en estudios como el realizado por Barluenga y Hernández-Olivares consiguen estudiar cada retracción aislando la probeta del exterior mediante un vendaje impermeable que evitaba la pérdida de agua durante el fraguado por secado de la pieza. (19)

La retracción térmica se produce por una mala disipación del calor desde el interior del cemento hasta las caras externas más frías. La hidratación del cemento produce una reacción exotérmica con valores que dependen del tipo de cemento y de

sus adiciones y finura. Este aumento de la temperatura produce dilataciones iniciales en el hormigón que al enfriar se retrae y fisura. Mientras más rápido sea este proceso peores resultados de fisuración se obtendrán en el hormigón, por lo que no son recomendables los cementos rápidos (R) que generan grandes cantidades de calor en las primeras horas en las que el hormigón no posee resistencia mecánica. (6)

El aumento de la temperatura inicial y su consiguiente expansión del hormigón, no produce tensiones superficiales de compresión en su cambio de líquido a sólido, debido al módulo de elasticidad extremadamente bajo que posee el hormigón en este estado semisólido. Cuando llega al máximo de calor el hormigón se ha solidificado y comienza por lo tanto a enfriarse con el ambiente. En elementos coaccionados se produce fisuración al no permitir que el material se ajuste a un menor tamaño. Estas tensiones serán más acusadas mientras mayor sea la diferencia de la temperatura del hormigón con la temperatura del ambiente. (36)

En cuanto al momento en que se produce cada fase, la retracción autógena se prolonga desde las pocas horas del comienzo del fraguado hasta varios días después con la finalización de la hidratación de los componentes libres de clinker. Mientras la retracción por secado se produce sólo cuando la superficie de la misma se expone al ambiente hasta el final del curado (40).

La deformación por retracción autógena es homogénea en toda la masa del hormigón, no sucediendo así con las otras dos que poseen un gradiente de diferencia de humedad o temperatura que marcan una dirección o plano de deformación.

Existe otro tipo de retracción, la retracción por fluencia del material, que se produce en hormigones sometidos a solicitaciones desde edades tempranas con cargas sostenidas en el tiempo a temperatura ambiente. Cuando la pieza está coaccionada el se produce una relajación del material. Esta relajación tensional se puede producir por cargas externas o por la propia tensión producida durante la retracción. Estas tensiones de no ser producidas por cargas externas, pueden producirse por materiales ajenos al propio hormigón, como las barras de armado por ejemplo.

Por lo tanto podemos decir que la deformación total por retracción se debe a la siguiente fórmula (38) en función del tiempo:

$$\epsilon_T(t) = \epsilon_{\text{autógena}}(t) + \epsilon_{\text{secado}}(t) + \epsilon_{\text{térmica}}(t) + \epsilon_{\text{fluencia}}(t)$$

*For.2.5. Fórmula de cálculo de la retracción en hormigones. (38)*

La retracción autógena y de fluencia producen tensiones por cambios volumétricos del propio material, mientras que la térmica y la de secado producen tensiones ajenas a la formación de éste.

#### **2.4.1.4.2. Ensayos de determinación de los tipos de retracción.**

Para la determinación del valor de deformación producido por la retracción autógena se realizan ensayos que mantienen la temperatura constante, y en cápsulas que evitan la evaporación de agua.

En estos estudios M. Sule notó un descenso de los valores de retracción autógena con el porcentaje de refuerzo, cualquiera que fuera su disposición, en hormigones armados con barras de acero. (38)

Para la deformación por retracción termal se emplean probetas curadas semi-adiabáticamente. En este tipo de retracción el refuerzo con barras de acero no altera los resultados, al poseer valores de dilatación similares al hormigón.

#### **2.4.1.4.3. Materiales de reducción de la retracción.**

Uno de los materiales desarrollados para el control de la retracción fue la parafina atendiendo a la disminución del calor de hidratación del cemento por Mihashi (40). La micro-cápsula de parafina se introducía en el hormigón con un agente retardador, que una vez se alcanzaba una temperatura según el tipo de parafina la cápsula rompía y expulsaba el retardador. Según el tipo de parafina que se empleara el agente retardador controlaba el aumento o la bajada de los valores de temperatura.

Otro de los sistemas de control de la retracción es también químico, desarrollado por Dhir (40), introduciendo elementos que disminuyeran el efecto de evaporación del agua de fraguado y un auto-curado en el cemento. Empleó polímeros sintéticos solubles en agua y elementos naturales químicos. Durante el desarrollo de los ensayos probó la mejora de las propiedades de la micro-estructura del hormigón, la calidad de la superficie y de la resistencia a compresión del material.

El empleo de áridos ligeros con capacidad de almacenar agua debido a su morfología porosa fue estudiada por Weber y Reingardt, sustituyendo un porcentaje de los áridos del hormigón por estos porosos, para emplearlos como reservas de agua durante el curado, incluso independientemente del curado que se practicara.

#### **2.4.1.4.4. Problemática en Canarias.**

Al depender este proceso de las características del cemento y del ambiente, debemos estudiar estos dos aspectos en el caso particular de Canarias.

Por un lado, el cemento con puzolanas naturales poseen bajo calor de hidratación, que se presenta en valores de resistencias bajas. Es por ello que son cementos que no retraen en demasía debido a las bajas cargas térmicas en el proceso químico de solidificación del producto.

El uso de materiales minerales que produzcan bajas temperaturas de hidratación ayudará a reducir las tensiones por temperaturas tempranas.

En cuanto a la modificación volumétrica de productos de cemento una vez hidratados que provocan la retracción autógena, podemos considerar este punto sin estudiar aún en los cementos puzolánicos de Canarias.

En lo referente al clima de Canarias es conocido el fuerte viento que reina prácticamente todo el año y las condiciones de soleamiento, que influirán mucho en la retracción por secado.

En el aspecto de la retracción por evaporación Razeq y Enein en 1999, establecieron fórmulas para la previsión de los valores que esta puede tomar basándose en que el hormigón es un medio poroso.

$$R_c = h_C (T_{da} - T_w) / L$$

donde  $R_c$  es la evaporación por secado ( $W/m$ ),  $h_C$  es el calor de convección transferido ( $W/m^2^{\circ}C$ ),  $T_{da}$  es el bulbo de secado de temperatura del aire del ambiente ( $^{\circ}C$ ),  $T_w$  (ambos  $T_{da}$  y  $T_w$  tienen en cuenta el ábaco psicométrico de ASHRAE) es el bulbo de humedad y  $L$  es el calor latente de vaporización del agua ( $^{\circ}C$ ).

*For.2.6. Fórmula de cálculo de la retracción por secado.*

Para el estudio del comportamiento en las primeras horas del hormigón, se hace necesario estudiar a edad temprana el módulo elástico, la resistencia a tracción y aquellas propiedades propias de un material visco-elástico (19).

#### **2.4.1.4.5. Investigaciones recientes.**

Para reducir el proceso de retracción algunos autores han estudiado el empleo de productos expansivos (EXP) como el óxido de calcio o de magnesio y reductores de la retracción (SRA) como el propilenglicol, por separado y en conjunto para estudiar el efecto sinérgico de ambos, en porcentajes de un 3% por separado y en combinación. (41)

Se obtuvieron buenos resultados en el uso de productos expansivos para hormigones curados mediante inmersión en agua, no siendo así en curados a humedad de ambiente. El trabajo de estos componentes expansivos se produce al combinarse con agua y llegar a aumentar lentamente su tamaño hasta un 90%. En el caso de muestras con el empleo de reductores de la retracción no se obtuvieron buenos resultados. En las

muestras de combinación de adiciones se consiguió un trabajo sinérgico de los materiales y por lo tanto una mejora en los valores, con reducciones de retracción.

C. Maltese (41) estudió también la importancia de la tensión capilar, y su importancia en la retracción por secado:

$$P = M (\Delta V/V)_{\text{elástica}} = 2 \gamma / r,$$

donde P es la presión capilar, M el módulo de compresibilidad (Bulk Modulus),  $\gamma$  es la tensión superficial del poro y r el radio del menisco.

*For.2.7. Fórmula de cálculo de la presión capilar.*

Por lo que la reducción de la tensión superficial reducirá la presión capilar. Este aspecto sucede en hormigones con reductores de la retracción (SRA) en su composición que por lo tanto retraen menos (41).

Este estudio de la capilaridad en el proceso de hidratación también ha sido estudiado por V. Morin. (42). Investigando paralelamente los valores de retracción autógena y de ultrasonidos. El estudio de la retracción autógena demostró que el desarrollo de tensiones capilares aumenta con el consumo de agua durante el proceso de hidratación, induciendo una nueva retracción a las 39 horas cercano a la disminución del 3% de la hidratación, como punto hiperestático de la curva que se presenta a continuación.

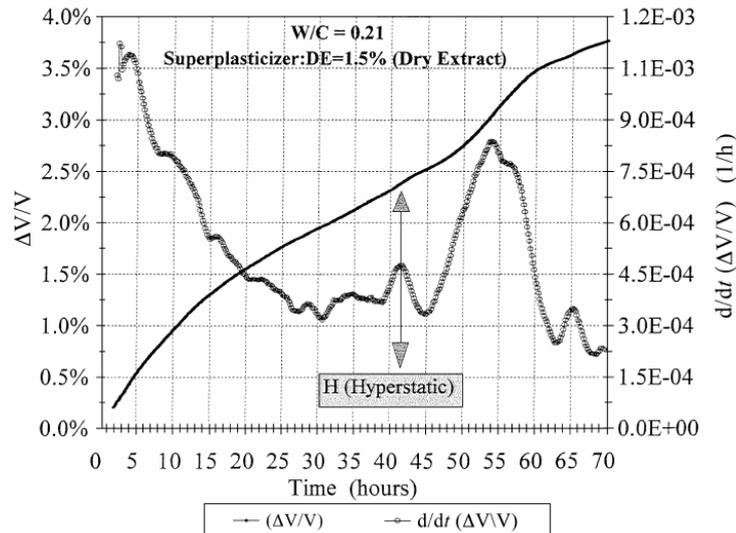


Fig.2.23. Gráfico de cambio volumétrico relativo en función de la hidratación (42).

Las tensiones capilares inducidas por la existencia de aire retenido entre el líquido y la fase sólida, y los efectos electrostáticos de repulsión debidos a la doble capa eléctrica formada por los iones de la superficie de las partículas sólidas y los iones de la solución alrededor de éstos, producen una retracción importante en las primeras horas. Estas cargas producen tensiones a compresión en el hormigón según aumenta la concentración de iones de Calcio por efecto capilar, provocando una fluencia del material y su retracción ( $\epsilon_{\text{fluencia}}$ ). (42)

El estudio del proceso de formación de capilares y su tamaño con el estudio de la hidratación nos lleva a contemplar tres fases: la primera entre un 0 y un 3% (punto hiperestático) del descenso de hidratación con la formación de capilares de radio 20 nm que bajan hasta llegar al 8% en una segunda fase con radio capilar de 10 nm con la determinación de la máxima energía disipada, hasta la tercera fase a partir del 15% con radio de capilares de 2 nm. (42)

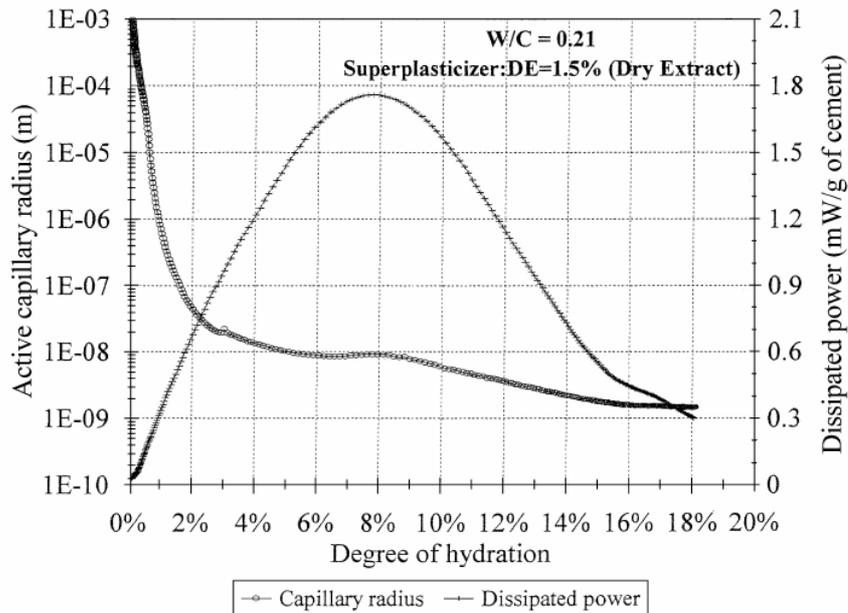


Fig. 2.24. Gráfico de relación entre radio capilar activo y energía disipada en función del descenso de la hidratación. (42)

El estudio de la morfología química de las muestras con estas adiciones de productos expansivos (EXP) como el óxido de calcio o de magnesio y reductores de la retracción (SRA) como el propilenglicol demostró como se esperaba que los SRA disminuyeran la formación de hidróxido de calcio, al contrario que con el EXP que al basarse en óxido de calcio aumento la cantidad de hidróxido cálcico. Se estudió mediante un espectroscopio de rayos X el aumento de Portlandita en las muestras con el uso de EXP y especialmente en la combinación de ambas (41).

En otro orden de cosas, F. Puertas, realizó estudios de retracción en morteros con cementos Pórtland comunes y alcalinos añadiendo fibras en su interior. Los cementos alcalinos activados con cenizas volantes son más estables dimensionalmente, al ser su producto de resultado más estable con una estructura tridimensional de hidratos aluminosilicatos. El empleo de la fibra produjo un aumento en la retracción química y una disminución a largo plazo de la misma, debido a que el trabajo de las mismas se produce con el hormigón endurecido durante la desecación del mismo. (25)

#### **2.4.1.5. COMPACIDAD. PERMEABILIDAD**

El concepto de compacidad y el de permeabilidad van ligados aunque no siempre directamente.

La compacidad de un material viene definida por la máxima cantidad de materia en un volumen determinado. Por tanto un material es más compacto cuanto menos cantidad de huecos posea entre sus elementos.

La permeabilidad de un material es capacidad que este posee para permitir el paso de gases o líquidos a través de su masa, para ello es necesario que en la masa existan huecos o poros y éstos estén intercomunicados.

##### **2.4.1.5.1. Introducción.**

Para determinar estos dos factores es necesario estudiar la estructura interior del material o micro-estructura. Como hemos visto en apartados anteriores la formación de los poros es propia de los procesos químicos de formación de los elementos sólidos del hormigón por efecto de la retracción hidráulica. Por otro lado también hemos visto que con la retracción por secado, la migración de agua desde la masa interna del hormigón hacia la externa va dejando vías de salida que posteriormente pueden servir de entrada de agentes perjudiciales para el hormigón.

Dentro de la formación de estos poros podemos distinguir entre micro-poros, poros capilares y macro-poros.

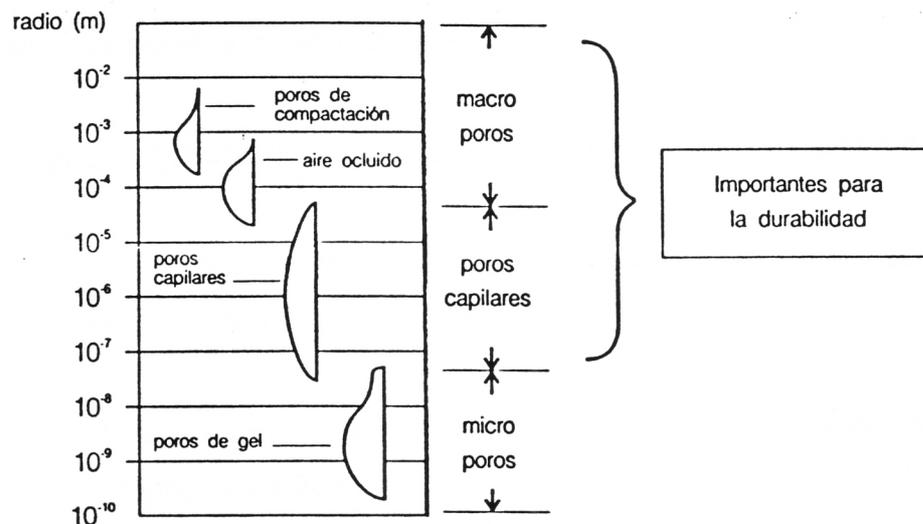


Fig.2.25. Diagrama esquemático de la estructura porosa del hormigón. (43).

Los poros de gel son tan pequeños que no influyen en las propiedades resistentes y de permeabilidad del hormigón, y son causados por la retracción autógena y por fluencia, como hemos desarrollado anteriormente.

Los poros capilares en su volumen y tamaño están ligados con la relación a/c y el grado de hidratación del cemento. En relaciones a/c bajas con curados buenos los capilares tienen tamaños de entre 10 y 50 nm, en relaciones a/c altas y en las primeras edades de hidratación los poros capilares pueden llegar hasta los 3,0  $\mu\text{m}$ . Los poros de tamaño superior a 50 nm tienen efectos negativos sobre las resistencias y la impermeabilidad, mientras que los inferiores a 50nm influyen más sobre la estabilidad dimensional. (43)

Los poros de aire son normalmente esféricos y pueden ser de dos tipos, los de compactación, generados durante el amasado de la pasta fresca y su tamaño suele ser  $\geq 3\mu\text{m}$ , y los de aire ocluido, introducidos con aditivos y con tamaños entre 20 y 500 nm. Pueden tener consecuencias negativas sobre la resistencia y la estabilidad del mortero u hormigón, pero cuando son generados mediante aditivos, mejoran la resistencia frente a las heladas.

Podemos afirmar que un hormigón es compacto cuando posee una porosidad total entre un 5-10% y entre un 10-15% para hormigones con bajas resistencias mecánicas (43), pues la relación entre compactidad y resistencia es determinante en esta última.

La permeabilidad está ligada a la estructura porosa del material, especialmente a la intercomunicación de los poros entre sí. Podemos tener un material poco compacto y ser poco permeable si su superficie es homogénea y sin huecos y no existe comunicación del exterior al interior mediante capilares o conductos. La permeabilidad obedece a la siguiente expresión:

$$k = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} \frac{\eta}{\Delta p}$$

donde: k: coeficiente de permeabilidad intrínseco

Q: caudal del fluido

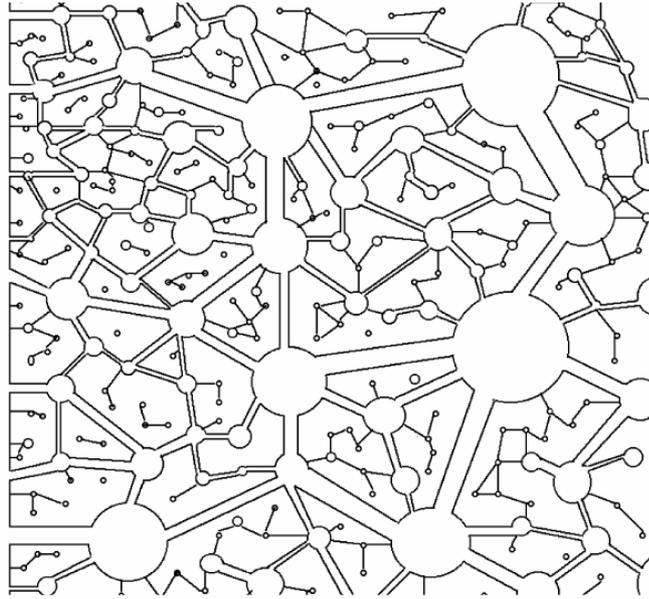
t: tiempo

A: superficie que atraviesa el fluido

$\eta$ : viscosidad del fluido

$\Delta p$ : diferencia de presión

*Fig.2.8. Fórmula de cálculo del coeficiente de permeabilidad intrínseco en un material poroso. (43)*



*Fig. 2.26. Imagen de la representación esquemática de un sistema bipofoso (43).*

La permeabilidad de un hormigón nos indica la capacidad que tiene el material de permitir el paso de agentes externos a su interior. Se trata de un factor muy importante en la durabilidad del hormigón y será estudiado en esta tesis como un parámetro más de predicción de la vida del material. Un material será en principio más durable mientras menos permeable sea y cuanto más compacto.

Al introducir barras de acero en el hormigón debemos saber que su protección es muy importante, para evitar su corrosión. La compactidad y especialmente la permeabilidad del material nos determinarán los recubrimientos que debemos tener en cada caso para una vida útil del acero que tengamos en su interior.

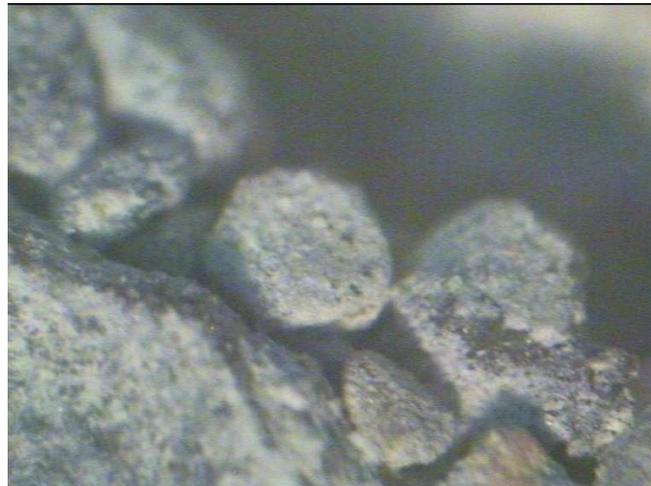
#### **2.4.1.5.2. Problemática en Canarias.**

Los valores de permeabilidad en las zonas de ambientes agresivos están determinados en la EHE-08 mediante ensayos de penetración de agua a presión UNE-EN 12390-8, especificando unos valores máximos para la profundidad máxima y

media. La permeabilidad del material se asegura además con el control de la resistencia y de la relación agua/cemento, incluyendo cantidades de cemento mínimas. (1)

En hormigones como los canarios con áridos obtenidos mediante machaqueo, para conseguir valores bajos de permeabilidad, es importante la trabajabilidad de la mezcla para un buen vertido en obra que evite segregaciones, marcando unas consistencias adecuadas con aditivos y un curado adecuado que consiga aprovechar las características del cemento puzolánico que se emplea.

La cantidad de cemento que en otros hormigones consigue con su aumento una mejora resistente y de la compacidad, puede en los canarios producir aumentos de la retracción del material, pues se aumenta el número de finos en la mezcla sin optimizar las granulometrías de éstas, con unos áridos que por su forma, permiten una mayor cantidad de poros en su constitución y hormigonado, así como de la ya mencionada segregación.



*Fig. 2.27. Imagen obtenida mediante microscopio óptico de 200 x de áridos en hormigón con problemas de segregación y falta de lechada en el borde de un poro.*



*Fig. 2.28. Imagen obtenida mediante microscopio óptico de 200 x de bordes de áridos y poro generado por la propia geometría de éste.*

Para conocer de la compacidad del material un método no destructivo es el de ultrasonidos (39), que se puede emplear incluso en la detección de discontinuidades de los materiales y huecos o poros, al disminuir la propagación de la onda en estas zonas.

Los ensayos de medida de la permeabilidad mediante agua a presión deben ser desarrollados específicamente para el estudio de la conductividad hidráulica de un hormigón de alta resistencia. Estos valores de permeabilidad nos servirán para predecir la capacidad de un hormigón como barrera ante un movimiento de iones y de fluidos. En hormigones y morteros de baja capacidad resistente los cambios de presión no afectan al coeficiente de permeabilidad, aunque sí el tamaño del espécimen en estudio, que con su aumento influye magnificando el coeficiente. (45)

Un método novedoso en la medida de la permeabilidad es el del estudio de probetas forradas sometidas a cargas en tres puntos que generan un gradiente de presión en los poros donde se encuentra el líquido (46).

La permeabilidad del material puede conocerse analizando el grado de relajación. En un material viscoelástico como la pasta de cemento, la carga continúa descendiendo mientras la fase sólida en el cuerpo poroso se relaja viscoelásticamente. W. Vichit-Vadakan estudió la permeabilidad y la relajación de pastas de cemento en edades tempranas.

### **2.4.1.5.3. Investigaciones recientes.**

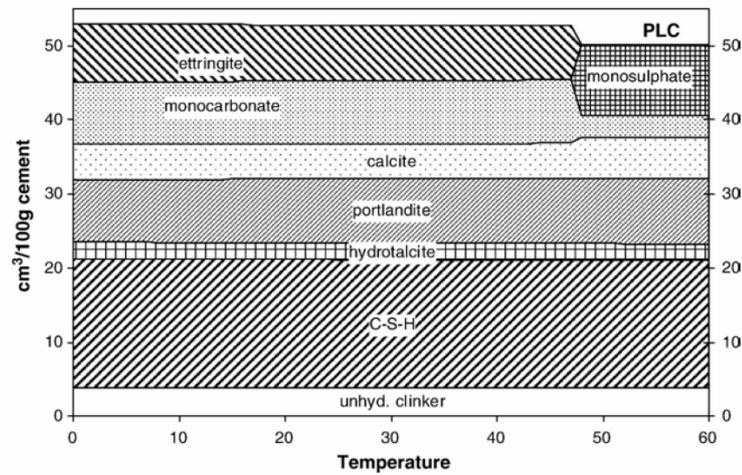
Un aspecto importante en la permeabilidad del hormigón es el de la temperatura de curado, el aumento de ésta produce un aumento de la permeabilidad y un descenso de la resistencia a largo plazo, al igual que efectos irreversibles de retracción y de fluencia. La mayoría de estos efectos se produce por el incremento de la polimerización de silicatos a elevadas temperaturas. (47).

La microestructura y la evolución de materiales cementosos han sido estudiados por S. Ouellet, mediante porosimetría de mercurio. En este trabajo se hace hincapié en la influencia de los finos en los resultados obtenidos por este método, y la relación de la permeabilidad con la resistencia del hormigón a compresión. (31)

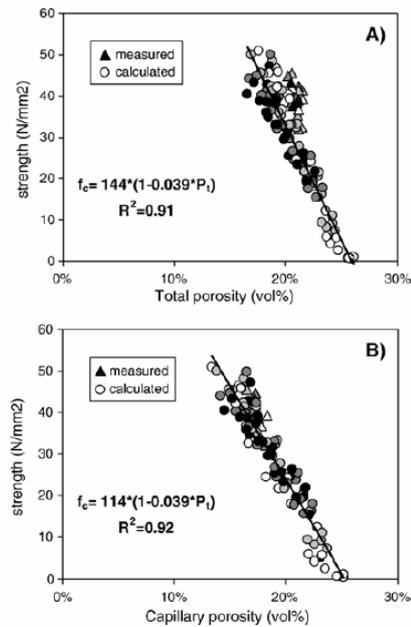
El diámetro del capilar disminuye con el tiempo de curado. La cantidad de poros por debajo del “pico principal de entradas” aumenta en todas las mezclas con el curado, que muestran un refinamiento de la porosidad debida al proceso de hidratación. Estudió los hormigones mediante el empleo de adiciones, determinando que las escorias influían negativamente en la porosidad, funcionando bien con cenizas volantes que no afectaban a dichos valores (31)

En el estudio realizado por V. Morin, mencionado en apartados anteriores, se relaciona la capilaridad y la retracción por fluencia, especialmente con los poros de menor diámetro que son los que ejercen la mayor fuerza capilar. Este estudio desarrolló resultados de probetas en el proceso de hidratación y no como es habitual en probetas sólidas. Como mencionamos anteriormente la evolución de los capilares más activos se produce entre un 3 y un 8 % de la capilaridad, con radios entre 10 y 20 nm, producidos al final de la primera fase de hidratación. Por encima de 10nm de tamaño de poro, el consumo de agua permite la producción de hidratos inter-granulares que rellenan el espacio inicialmente ocupado por el agua. Por debajo de 10nm de radio, comienza una nueva fase, el agua es consumida en la porosidad de los hidratos para producir hidratos internos que expanden al alcanzar el tamaño de las partículas de cemento anhídradas. (42)

B. Lothenbach (48) estudió la relación entre la temperatura y la creación de compuestos en cementos y la porosidad de los mismos. Determinó que con el aumento de la temperatura se modifica la composición de los productos sólidos, disminuye el volumen de éstos, se incrementa la porosidad y disminuye la resistencia a compresión mediante cálculos termodinámicos. Con la temperatura se forman productos más densos, con menos porosidad del gel que recae en una mayor porosidad en el mismo grado de hidratación.



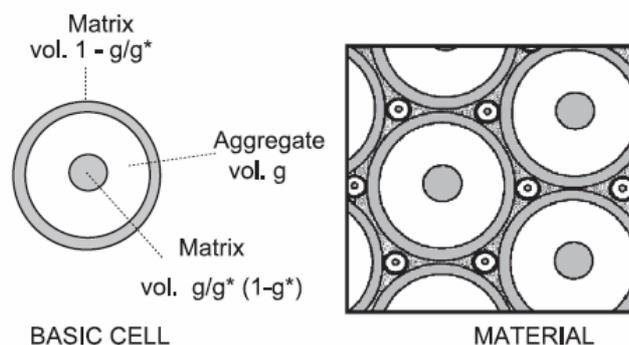
*Fig.2.29. Imagen esquemática del volumen calculado mediante modelos basados en la termodinámica de hidratos en cemento Pórtland en función de la temperatura suponiendo una disolución igual en las fases de clinker.*



*Fig.2.30. Gráficos de cálculo de la porosidad total y capilar en relación con la resistencia de morteros.*

Mediante estos modelos termodinámicos se aprecia una correlación entre la porosidad calculada y la resistencia. Existe una dependencia frágil entre la porosidad calculada sobre la temperatura, que desaparece cuando se asumen diferentes densidades de C-S-H a las distintas temperaturas. La distribución heterogénea de los productos de hidratación y las diferencias en la morfología de los hidratos juegan un papel secundario en el desarrollo de resistencias, siendo el principal aspecto que afecta a la resistencia el de la minoración de espacio vacío o de la porosidad capilar del sistema, como demostraron Verbeck y Helmuth. (48)

El empleo de modelos matemáticos en el cálculo del comportamiento de los materiales cementicios fue desarrollado por A. Lecomte (49), empleando el programa informático BetonlabPro2, que reproduce la masa como esferas o celdas de distinto tamaño (modelo de tres esferas) para morteros. Se estudiaron diversos factores o variables como la cantidad de cemento, la dosificación de agua, la cantidad de arena, la incorporación de agentes contra la retracción y comparando los resultados de este modelo con otros como el del Comité Euro-Internacional del Hormigón- Federación Internacionales de pretensado CEB-FIB 213/214 “modelo de calculo de 1990” para el cálculo de la retracción del hormigón o el de Afrem.



*Fig. 2.31. Modelo de la triple esfera en que se basa el programa informático BetonlabPro2. (49)*

R. Demirboga estudió la relación entre la velocidad de las ondas de ultrasonido y la resistencia de hormigones con adiciones minerales, como escorias de altos hornos y cenizas volantes. Determinó bajos niveles de velocidad de ultrasonidos y compresión en hormigones con cenizas volantes, especialmente en las primeras fases del curado, y sobretodo con altos contenidos de cenizas volantes. De cualquier manera el incremento del tiempo de curado mejoró los resultados. Los valores obtenidos por las escorias fueron peores que los de las cenizas en cada fase y dosificación de adición. (50)

El incremento de los valores a compresión fue mayor que el de ultrasonidos, estableciendo una relación exponencial de 0.96 entre la velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión. (50)

El estudio de ultrasonidos ha sido realizado en hormigones con fibras con buenos resultados en aquellos con fibras de acero, cuya incorporación en la masa produjo aumentos marginales de la velocidad. (24)

## **2.4.2 PROPIEDADES QUÍMICAS.**

### **2.4.2.1. CARBONATACIÓN.**

#### **2.4.2.1.1. Introducción.**

El mecanismo de carbonatación consiste en la difusión del anhídrido carbónico y su reacción química con los compuestos del hormigón. El dióxido de carbono de la atmósfera se difunde a través de los poros del hormigón y reacciona con los productos hidratados. Es propiamente la reacción del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) con el Hidróxido cálcico ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), los geles de cemento C-S-H. De estas reacciones la más preocupante es la de la asociación del dióxido de carbono con el hidróxido de calcio ya que es éste el que aporta un pH alto al hormigón. Esta reacción es químicamente irreversible y es la causante de la despasivación del hormigón, pues el producto obtenido el  $\text{CaCO}_3$  posee un bajo pH.

La carbonatación afecta a la fase plástica y a la sólida del hormigón, y desprotege químicamente al acero embebido en el hormigón, que se encuentra como expuesto a la atmósfera. Es por ello que la carbonatación y posteriormente la corrosión sea mayor en áreas con contaminación y altos contenidos de  $\text{CO}_2$ . El proceso de carbonatación es lento en áreas de contaminación normal con volúmenes del orden de 0.03%, y con hormigones densos y con reservas de cemento y bajas relaciones de agua/cemento (43).

El cemento Pórtland en comparación con el cemento blanco posee un Ph mayor y es por lo tanto posee menos resistencia al ataque del  $\text{CO}_2$ . (10)

La carbonatación está asociada a los casos de corrosión generalizada, ya que afecta a la pieza igualmente en toda su longitud.

#### 2.4.2.1.2. Fases de la Carbonatación.

La carbonatación es dividida en cinco fases según Pade con la consiguiente pérdida progresiva de Ph (51).

En la primera fase de “hormigón intacto” el pH es superior a 12.5 y la fase sólida consiste en la unión de hidróxido de Calcio (CH), silicato de calcio hidratado (CSH), tetra-calcio mono-sulfoaluminato (AFm) y etringita (AFt). Cuando el pH baja del valor de 12.5 el hidróxido de calcio se transforma en carbonato de calcio (primera fase). Cuando el Ph baja ya de 11.6, el tetra-calcio mono-sulfoaluminato comienza a descomponerse (fase II), y bajo un Ph menor de 10.5 la ettringita se descompone (fase III). Finalmente, con un Ph menor a 10, el silicato de Calcio hidratado, que se había descalcificado en el proceso de las fases II y III, con suficiente tiempo se transformará en gel de sílice y óxido de Calcio hasta dejar la pasta sin óxido de calcio que carbonatar (51).

Si se considera que el 100% del óxido de calcio encontrados en CH, AFt y AFm, y el 50% del óxido de calcio encontrado en el CSH se han transformado en Carbonato de Calcio en el hormigón carbonatado, entonces alrededor del 75% del óxido de calcio del Clinker original se habrá hidratado.

#### 2.4.2.1.3. Profundidad de Carbonatación

La carbonatación es un proceso que comienza de las capas superficiales del hormigón hacia su interior. La difusión del dióxido de Carbono se estudia como la de un gas en un sólido mediante la segunda Ley de Fick que se presenta a continuación:

$$D = k t^{0.5}$$

donde D es el coeficiente de difusión, k es la constante del tipo de hormigón y t es el tiempo.

*For. 2.9. Fórmula de la segunda Ley de Fick (52).*

Otra manera de determinar la carbonatación es mediante la ley de difusión. Considerando la difusión como el transporte de un gas o un líquido a través de un medio poroso en función de un gradiente de concentración. Que de acuerdo con la primera ley de Fick la cantidad de CO<sub>2</sub> que ingresa en el hormigón es:

$$J = -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

donde  $J$  es la flujo de dióxido de carbono (g/m<sup>2</sup> s),  $D$  es un coeficiente de difusión que depende de la temperatura (m<sup>2</sup>/s),  $c$  es la concentración de CO<sub>2</sub> (g/m<sup>3</sup>) y  $x$  es la profundidad de penetración.

*For. 2.10. Primera Ley de Fick. Fórmula de cálculo de la profundidad de carbonatación en función del tiempo (52).*

El empleo de la primera ley nos habla de la densidad de flujo en el material y la segunda de la concentración a una profundidad y un tiempo determinados según las características del hormigón.

En conclusión, podemos decir que la segunda ley de Fick, se basa en la consideración de que cada hormigón posee una constante de carbonatación independientemente de la concentración. En la realidad, la reacción de carbonatación influye por sí misma en la estructura porosa de la muestra, especialmente en la reducción del volumen de poros (52).

El carbonato de Calcio, principal producto de la carbonatación, bloquea los poros abiertos y producen según el hormigón carbonata una reducción de la difusividad del gas. Si la reducción de la difusividad del gas o el coeficiente de carbonatación se considera como un parámetro, el coeficiente de carbonatación debe decrecer en función del tiempo (51).

La ecuación presentada es la más aceptada aunque en los casos de hormigones con gran resistencia o bajo exposiciones al exterior no poseen una relación igual a la raíz cuadrada del tiempo en esos casos el índice de raíz 0.5 suele ser menor.

La carbonatación es variable en un mismo hormigón si éste se encuentra expuesto, y se produce en porcentajes de humedad relativa entre 40-80%. El tipo de cemento y sus adiciones influyen en el proceso de carbonatación y en su profundidad, eso ha hecho que diversos autores añadan factores correctores a la fórmula de cálculo de la profundidad en el tiempo (53).

El proceso de carbonatación es mayor en elementos protegidos de la lluvia. Esto se debe a que en el proceso de lluvia los poros del hormigón se bloquean y el proceso de evaporación del agua introducida en el hormigón es más lento que en el medio normal. Es por ello que incluso podemos diferenciar la profundidad de carbonatación según se produzca en elementos expuestos a lluvia o no (44).

Normalmente hay que tener en cuenta que la humedad en el interior de un material poroso como el hormigón suele ser mayor que la del exterior y los procesos de humectación y secado de las piezas son más pausados y progresivos que los del ambiente. Las oscilaciones de humedad y de temperatura son menos drásticas que en el ambiente exterior. Por ejemplo en una estación como el verano con varias semanas sin llover el hormigón habrá tenido tiempo de bajar su humedad interior, pero en una lluvia ocasional la humedad relativa del medio ambiente variará hasta un 100% mientras que en el hormigón no aumentará si esta no se mantiene varios días.

La EHE-08 establece para el cálculo de la profundidad de entrada de elementos agresivos en el hormigón la segunda Ley de Fick, desarrollando un modelo de carbonatación que calcula el tiempo en que esta se produce a una profundidad de la superficie mediante la siguiente expresión:

$$t = (d/K_c)^2$$

d Profundidad, en mm.

t Tiempo, en años.

*For. 2.11. Expresión para el cálculo de tiempo necesario para que se produzca carbonatación a una distancia de de la superficie del hormigón. (1)*

$$K_c = c_{env} \cdot c_{env} \cdot a \cdot (f_{cm})^b$$

donde:

$f_{cm}$  Resistencia media del hormigón a compresión, en  $N/mm^2$ , que puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada ( $f_{ck}$ ).

$c_{env}$ , Coeficiente de ambiente, según tabla A.9.1 EHE-08 (1 protegido de la lluvia, 0.5 expuesto a la lluvia).

$c_{air}$ , Coeficiente de aireantes, según tabla A.9.2 EHE-08 (1 en hormigones con porcentaje de aire ocluido menor a 4.5 %, 0.7 en hormigones con porcentaje de aire ocluido mayor a 4.5 %) .

a, b Parámetros función del tipo de conglomerante, según tabla A.9.3 EHE-08.

*For.2.12. Expresión para el cálculo del coeficiente de carbonatación. (1)*

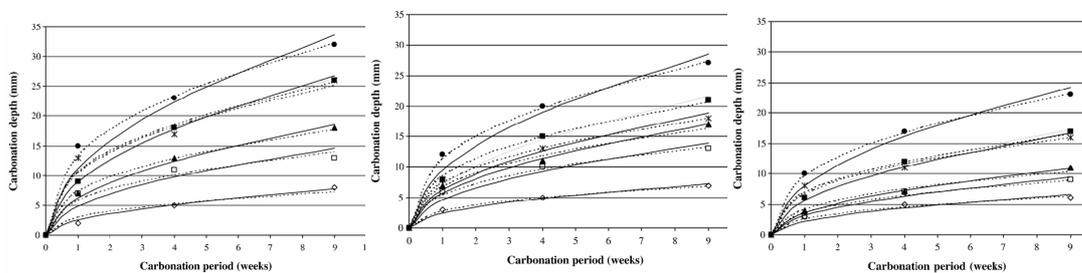
#### **2.4.2.1.4. Problemática en Canarias**

En Canarias los cementos que se emplean contienen adiciones puzolánicas. Según diversos autores la cantidad de  $Ca(OH)_2$  en estos cementos es menor que en los cementos Pórtland debido a la sustitución de un porcentaje de los mismos en el proceso de fabricación y por lo tanto poseen menos cantidades de portlandita para la consumición en el proceso químico, que les resta capacidad resistente (10).

Sin embargo K. Sisomphon (52), establece que los cementos puzolánicos son menos porosos, impidiendo el acceso del  $CO_2$ , aunque siempre que posean un curado

adecuado, pues son más sensibles y lentos en este proceso. Este beneficio en los cementos con puzolanas puede ser perjudicial si no se efectúan curados adecuados y prolongados en el tiempo, con peores resultados que un hormigón con cemento Pórtland sin adiciones.

Según Sisomphon, se producen aumentos de los valores de carbonatación en los hormigones que no empleaban cenizas volantes o escorias de alto horno como adiciones, sucediendo lo contrario en hormigones con un 5% de humo de sílice. De las tres adiciones es la de cenizas volantes la que menos afectó al hormigón en el proceso de carbonatación. (52)



*Fig. 2.32. Gráficas de cálculo de la profundidad de carbonatación según un tiempo determinado en probetas con cemento con y sin adiciones en distintas cuantías mediante proceso de carbonatación acelerado (52). Este proceso aumenta las concentraciones normales del medio ambiente de 0,03-0,04 % hasta concentraciones del 3% por volumen con una humedad relativa del 65%, controlada por una solución de  $NH_4NO_3$  y con un flujo de gas constante de  $100\text{ cm}^3/\text{min}$ . La primera se realiza con hormigones con tres días de curado, la segunda con hormigones con siete días de curado y la última con veintiocho días de curado.*

En el ejemplo de las gráficas presentadas anteriormente, se puede apreciar una disminución significativa de la profundidad de carbonatación con el aumento del tiempo de curado en todas las series estudiadas. Además los hormigones con menor profundidad de carbonatación en estos ejemplos de carbonatación acelerada son los de cementos sin adiciones.

A nivel de control de los hormigones se podría marcar un tiempo mínimo de curado según el cemento y el ambiente al que éste es expuesto, siendo este aspecto más efectivo que aumentar cantidades de cemento o añadir adiciones que se contradicen según los autores que se consulten. Al igual que para determinar la resistencia de un hormigón se realizan probetas, de un hormigón podríamos ensayar la carbonatación del mismo y poder de esta manera bajar de clase resistente en ambientes más agresivos y disminuir cantidades de cemento, con el ahorro económico que esto conllevaría.

#### 2.4.2.1.5. Investigaciones recientes.

Y. Houst desarrolló estudios de la profundidad de carbonatación en elementos expuestos a la lluvia de elementos con dosificaciones diversas después de cuarenta semanas de exposición. (44)

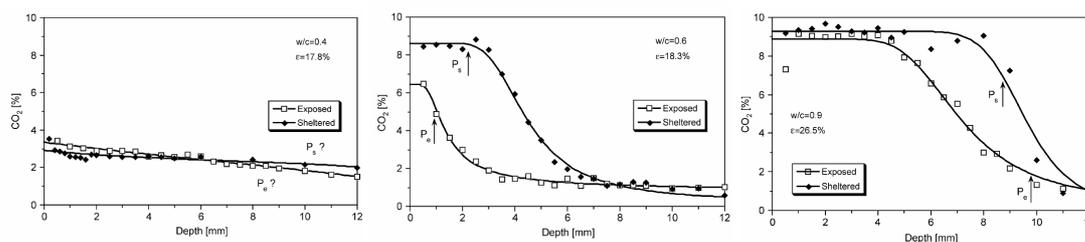
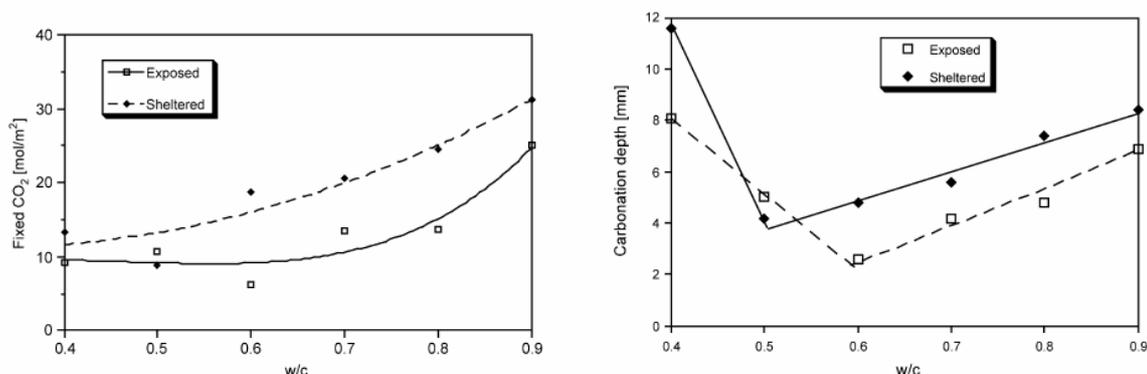


Fig. 2.33. Gráficas de estudio entre la relación A/C y la cantidad de CO<sub>2</sub> en el desarrollo de la profundidad de la pieza, comparando según sea una pieza expuesta o protegida de la lluvia. La de la izquierda con una relación 0.4, la central 0.6 y la de la derecha 0.9. (44)

Se obtienen varias conclusiones. La ya mencionada de que un hormigón protegido de la lluvia se carbonata más fácilmente, que mientras mayor sea la proporción a/c mayor es la profundidad de carbonatación siendo el proceso de carbonatación es más marcado en hormigones con alta relación a/c, bajando bruscamente la cantidad de CO<sub>2</sub> en poca profundidad.

La disminución de la profundidad de carbonatación en relación con de la relación de a/c no es siempre directa. Y. Houst encontró que existe un aumento de la

carbonatación en hormigones de muy baja relación a/c 0.3-0.4 con respecto a relaciones 0.5, debido seguramente a la falta de compactado y el daño producido por la retracción autógena (44).



*Fig.2.34. Gráficas que demuestran un estado óptimo para la relación agua cemento de 0.5 e incluso 0.6 en hormigones expuestos. En la izquierda se representan la cantidad de carbonatos formados en 40.5 semanas y en la gráfica de la derecha se estudia la carbonatación aparente calculada mediante los datos de carbonatación. (44)*

En el estudio de hormigones con grandes cantidades de adiciones de cenizas volantes de baja calidad, L. Jiang (54), demostró un aumento de la carbonatación con la sustitución de este elemento por cemento Pórtland. Empleó también activadores que consiguieron mejorar estos datos.

El estudio de los cementos con bases de calcio-sulfoaluminato por parte de L. Zhang estableció que la relación de carbonatación no es lineal con la relación a/c, mediante ensayos con empleo de fenofaleína, microscopio de infrarrojos y análisis termogravimétrico. (55)

En otro orden de cosas, G. Cultrone (44), estudió los efectos de la carbonatación natural y forzada en morteros con bases de arcilla, y su importancia en la dureza final obtenida en los mismos.

## **2.5 EL PROCESO CORROSIVO DE BARRAS DE REFUERZO DE ACERO EN HORMIGÓN ARMADO.**

El empleo de barras de acero cada vez más resistentes, con mayores cantidades de carbono, hace que éstas sean más sensibles a la combinación con el oxígeno a la oxidación. Antiguamente el uso del conocido vulgarmente por hierro dulce más dúctil y con menos carbono producía menos patologías por el mal uso del material, bien por malas disposiciones constructivas o bajas calidades de los hormigones, con unas categorías resistentes menores que los actuales.

Para garantizar la vida útil del acero y de la propia estructura de hormigón armado, el recubrimiento de hormigón protege a la barra de acero como barrera física y mediante su alcalinidad desarrolla una capa pasivante en la barra en valores de pH altos en torno a 12.5.

La durabilidad del hormigón puede ser muy dilatada. Sin embargo, al igual que la piedra natural, se puede ver afectado por distintos tipos de deterioro ya que a pesar de su apariencia de material denso y pétreo, resulta permeable a líquidos y gases. Esto es debido a la red de poros que se genera en su interior, ocasionada por el exceso de agua de amasado. Después del fraguado, el agua queda retenida en el interior o se evapora pero conforma una red de capilares que junto con las burbujas de aire ocluido, constituyen el camino de entrada a los agentes exteriores. (57)

La presencia de agua o humedad es el factor común a los diferentes tipos de deterioro que puede sufrir la pasta de cemento, a excepción del deterioro mecánico. El transporte de agua a través del hormigón viene determinado por el tipo, tamaño y distribución de los poros y por las fisuras (micro o macro fisuras). Además, la penetración en el hormigón de gases ácidos como el CO<sub>2</sub> o el SO<sub>2</sub>, o la penetración de cloruros procedentes de sales de deshielo o ambientes marinos, pueden acabar produciendo corrosión en las armaduras. Así pues, el control del tipo y distribución de poros y fisuras se convierte en labor esencial para lograr una adecuada durabilidad (43).

Nosotros nos centraremos en los procesos que influyen en la penetración del ión cloro en la masa del hormigón y en el proceso de despasivación de la armadura, habiendo tratado este aspecto ya en el apartado dedicado a la carbonatación 2.4.2.1.

### 2.5.1. INTRODUCCIÓN.

Los mecanismos por los que los agresivos pueden penetrar en el hormigón son: absorción, difusión, permeabilidad o migración, según Andrade (58).

La absorción capilar es un fenómeno que se produce debido a los efectos de la tensión superficial en capilares que ocurre al poner en contacto un líquido con un sólido poroso. La altura que alcanzará el líquido, o la masa de él por unidad de superficie, depende del tamaño de los poros, la viscosidad del líquido y la temperatura. Obedece a la ley de Jurin.

$$h = \frac{2\gamma \cos \varphi}{\rho g r}$$

donde:            h: altura capilar  
                       $\gamma$ : tensión superficial del líquido  
                       $\varphi$ : ángulo de contacto entre líquido y hormigón  
                       $\rho$  : densidad del líquido  
                       $g$ : 9.8 m/s<sup>2</sup>  
                      r: radio del capilar

*For.2.13. Fórmula de cálculo de la altura capilar según la ley de Jurin.*

La difusión iónica se produce cuando hay una diferencia de concentración. En el caso del hormigón esta difusión tiene lugar en general en estado no estacionario, y se resuelve aplicando la segunda ley de Fick que mencionamos anteriormente.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Cuya solución para unas condiciones de contorno determinadas y un medio semi-infinito unidireccional da:

$$C_x = C_s \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

donde:  $C_x$ : concentración a una distancia  $x$   
 $C_s$ : concentración en la superficie  
 $D$ : coeficiente de difusión  
 $t$ : tiempo  
 $\operatorname{erf}(z)$ : función error

Tanto la difusión como la absorción capilar son fenómenos que se ajustan a la llamada “función de la raíz cuadrada del tiempo” empleada anteriormente en el capítulo 2.4.2.1.3. para el cálculo de la profundidad de carbonatación (for. 2.5).

La permeabilidad, como mecanismo de penetración de un agresivo, es un fenómeno mucho menos común. Se produce por la presión de líquidos o gases y depende de la estructura de los poros y de la viscosidad del fluido. Obedece a la siguiente expresión:

$$k = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} \frac{\eta}{\Delta p}$$

donde:  $k$ : coeficiente de permeabilidad intrínseco  
 $Q$ : caudal del fluido  
 $t$ : tiempo

A: superficie que atraviesa el fluido

$\eta$ : viscosidad del fluido

$\Delta p$ : diferencia de presión

*For.2.14. Formula del coeficiente de permeabilidad intrínseco.*

La migración iónica consiste en el transporte de iones debido a la acción de un campo eléctrico. Este fenómeno de transporte puede resultar dañino en estructuras cercanas a redes eléctricas o a largo plazo en las sometidas a protección catódica.

En el hormigón suelen darse simultáneamente más de un mecanismo de transporte, por lo que resulta complejo calcular y predecir las velocidades de penetración con exactitud.

Los cloruros se pueden transportar en combinación con el agua a través de los espacios dejados por los microporos, debido a las diferencias de presión de agua entre el interior y el exterior del material, y por diferencias entre concentraciones de cloruros. La segunda manera es conocida por difusividad de cloro, y posee una gran dependencia de la relación agua/cemento (59).

La difusividad aparente del cloro puede predecirse mediante una homogenización diferencial de inclusiones esféricas no difusivas en una matriz difusiva, con un coeficiente de difusividad de cloro en morteros de cemento en función de la porosidad y de la difusividad del cloro en la solución microporosa. (59)

La EHE-08 establece un modelo de penetración de cloruros basado en la segunda Ley de Fick, así como un periodo de tiempo en el que la propagación se considera concluida a partir de la pérdida de sección de la armadura. (1)

$$t_p = 80 d / \varphi v_{\text{corr}}$$

$t_p$  Tiempo de propagación, en años.

$d$  Espesor de recubrimiento en mm.

$\varphi$  Diámetro de la armadura, en mm.

$v_{\text{corr}}$ , Velocidad de corrosión, en  $\mu\text{m/año}$ .

*For.2.15. Formula para el cálculo del tiempo de propagación. (1)*

El proceso de corrosión produce dos efectos básicos. Por un lado una fisuración longitudinal debido a los productos de la corrosión expansivos que producen presión en el hormigón, y por otro la degradación del acero con una menor sección útil de material y una pérdida de unión con el hormigón.

Las fisuras también pueden ser producidas por las cargas a las que se someten las piezas de hormigón, bien a tracción o a flexión, constituyendo puntos de paso para la penetración de agentes como iones cloro, disminuyendo el tiempo de comienzo de la corrosión (37).

En numerosos estudios afirman que en las fisuras por flexión se puede producir un efecto de auto rellenado de las mismas por los productos de la corrosión que reducen la posterior actividad corrosiva. El estudio de la protección en ambientes con presencia de cloro determinará mayores recubrimientos como protección de las barras. (37)

Por este lado la EHE-08 determina los valores de ancho de fisura, para evitar la entrada de estos agentes contaminantes por ellas. El estudio de las fisuras realizado por T. Vidal (37) determina que el tamaño de ancho de fisura que puede preocupar en estos procesos es aquel que supera los 0.3 mm.

### **2.5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CORROSIVO.**

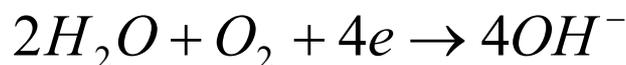
La oxidación es consecuencia de un proceso electroquímico. Este proceso se produce mediante la presencia de un electrolito, una diferencia de potencial eléctrico y

la existencia de oxígeno para combinarse con el material. Generalmente el electrolito es el agua con sustancias disueltas.

El proceso de corrosión por ión cloro normal es el siguiente: con el paso de los años el hormigón se va carbonatando y perdiendo progresivamente el pH característico, hasta llegar a valores incluso por debajo de 10.50. Este proceso se ha producido por la entrada de dióxido de carbono en el hormigón y su combinación con los silicatos cálcicos que lo compone (2.4.2.1.2). A su vez en los procesos de humedades bajas el cloro se sitúa en las capas externas del hormigón, penetrando en el interior asociado con el agua en los periodos de mayor humedad o lluvia por capilaridad o diferencia de presión. (60)

Cuando el ión cloro llega al hormigón puede que éste se encuentre ya sin protección y comience entonces a combinarse con el agua y el oxígeno con los compuestos del acero. La mayor cantidad de cloruros aumenta el porcentaje de área atacada y un mayor grado de acidación local en las áreas corroídas. (60).

Para que una reacción de corrosión comience, es necesario que se provoque sobre el acero la formación de zonas con potencial electroquímico diferente: ánodos y cátodos. Si la diferencia de potencial es suficiente, se produce un paso de corriente apreciable entre estos dos tipos de zonas cerrándose el circuito a través del hormigón (electrolito). Pero para que esta corrosión se mantenga a lo largo del tiempo, es necesario que la reacción catódica sea constantemente estimulada por la existencia de agua y oxígeno siguiendo la siguiente fórmula:



*For.2.16. Fórmula de reacción catódica en el proceso de oxidación del acero.*

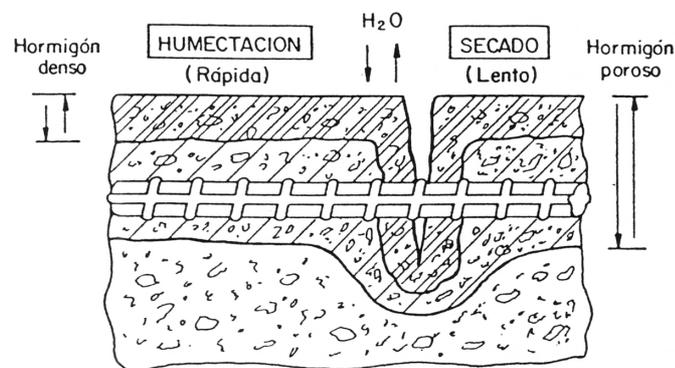
Como podemos apreciar en la fórmula el agua es esencial en el proceso y por lo tanto los valores de humedad del hormigón que rodea la barra son importantes, bien porque en humedades altas existen grandes cantidades de agua o porque en valores de humedad bajos es más fácil la entrada de oxígeno. En hormigones totalmente saturados no es posible la entrada de oxígeno al taponar los poros, como comentamos en el

apartado de la carbonatación (2.4.2.1.). El hormigón no posee generalmente la misma humedad del ambiente pues los procesos de secado y humectación son pausados y lentos.

Los valores óptimos para que se den los dos procesos al tiempo, que suelen ser los normales en los hormigones al ser la media entre los ciclos de humectación y desecación, son los de humedades entre el 50 y el 100%.

Si los poros están saturados de humedad, entonces aunque la resistividad se sitúa en valores mínimos y por lo tanto la pila de corrosión estará muy facilitada, el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la armadura. En estas condiciones se dice que el proceso está controlado por el acceso de oxígeno y las velocidades de corrosión no serán las más elevadas, sino moderadas e incluso muy bajas, como es el caso de las armaduras sumergidas.

Cuando los poros contienen muy poca humedad, entonces la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se encuentra muy dificultado. En este caso, la velocidad de corrosión también será baja, aunque el hormigón se encuentre carbonatado y contaminado por cloruros. (61)



*Fig. 2.35. Esquema de procesos de humectación y desecación en el ámbito de la fisura (61).*

La temperatura en la corrosión tiene un papel importante pues su incremento favorece la disminución de la resistividad al aumentar la movilidad iónica, una disminución de la energía de activación del proceso de oxidación del hierro y una

evaporación del agua de los poros, que contrarrestará la disminución de la resistividad al disminuir la cantidad de agua en el proceso corrosivo.

### **2.5.3. FACTORES EN EL HORMIGÓN QUE INFLUYEN EN EL PROCESO CORROSIVO.**

Como hemos visto el proceso de corrosión es el resultado de múltiples factores que bien individualmente o en conjunto afectan a las condiciones en las que se encuentra la barra de acero en el hormigón. Es por ello que debamos recopilar aspectos de apartados anteriores.

La relación a/c puede ser un factor determinante en la realización de hormigones durables, mejorando las resistencias mecánicas y físicas. El descenso en la relación a/c será beneficioso para un hormigón siempre que se mantengan unas condiciones de trabajabilidad de la mezcla, es decir, debemos con seguir cuantías bajas de agua en relación con el cemento manteniendo una docilidad de la masa adecuada.

De nada nos sirve realizar hormigones con poca cantidad de agua que sean poco dóciles en obra, en los que se produzcan coqueas por un mal vertido o difícil vibrado, o segregación de sus componentes. Para ello es necesario optimizar las dosificaciones entre áridos, empleo de finos en sustitución de áridos de mayor tamaño, emplear aditivos plastificantes... Estos hormigones de relaciones bajas y consistencias plásticas o fluidas serán buenos en su puesta en obra, pero necesitarán de aportes de agua con mayor necesidad al carecer de menos reservas de agua.

El curado de los hormigones es un aspecto muy importante especialmente en los que empleen cementos con adiciones puzolánicas, para una correcta formación de compuestos cementicios y una reducción de la retracción por secado e incluso para proteger ante excesos de temperaturas.

Hemos visto que la temperatura afecta a la formación del hormigón en el volumen de sus componentes químicos finales y a la retracción, con una aceleración en la obtención de las primeras resistencias, pero un descenso en las finales. La temperatura también favorece la migración de agua del interior al exterior, dejando una serie de poros capilares en la migración de ésta.

A su vez la retracción no se explica sin tener en cuenta otros factores como la relación a/c, el tipo de cemento, normal o rápido (con mayores retracciones al poseer temperaturas excesivas en la formación de compuestos), la fluencia del material producida por la capilaridad del hormigón (en mayor medida en poros de pequeño tamaño), aspectos desarrollados en capítulos anteriores.

La fisuración producida también juega factores determinantes en la rotura de la capa protectora que envuelve la masa de hormigón, creando zonas de carbonatación y corrosión más acelerada, donde desaparece el recubrimiento de la masa.

En general debemos tener en cuenta que los procesos no se producen aisladamente, siempre entran en juego varios factores, que desencadenan otros que pueden reincidir en los primeros.

Se deben realizar mayores esfuerzos desde el proyecto y posteriormente en la puesta en obra de los hormigones. De nada sirve emplear hormigones con grandes posibilidades si nunca llegan a “madurar” al no poseer curados adecuados, que sean específicos para cada lugar, momento de construcción, orientación de la pieza...etc.

#### **2.5.4. TIPOS DE CORROSIÓN.**

La corrosión atendiendo a la cantidad de área atacada puede distinguirse en generalizada y localizada.

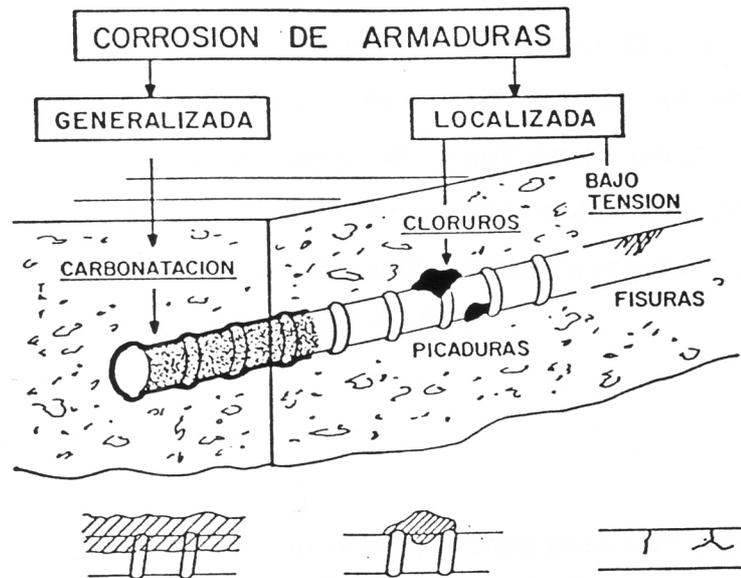


Fig. 2.36. Vista esquemática de los tipos de corrosión (61).

La corrosión generalizada se produce por una pérdida de protección general del hormigón, normalmente producida por efecto de la carbonatación de la pieza, que pierde los valores alcalinos de altos pH importantes en el hormigón. Como vimos en apartados anteriores la reducción de estos valores se relacionan con la calidad del hormigón, tanto por su compacidad, baja permeabilidad, cantidad de cemento y elementos estables, calidad del curado...etc.

Mientras la corrosión localizada se produce por agentes externos agresivos en zonas que no han perdido naturalmente la alcalinidad que las protege, pero que por efecto de la permeabilidad en una zona heterogénea de la pieza se favorece la entrada de éstos iones y de agua para el proceso corrosivo.

Debemos también hablar de la formación de macropares galvánicos debido a la existencia de zonas de la armadura con distinto potencial de corrosión, con zonas que se corroen –ánodos- y otras que se mantienen pasivas –cátodos- (61).

El estudio de la conductividad eléctrica del hormigón en relación con la capilaridad de éste fue realizado por V. Morin en el proceso de formación del hormigón. El estudio revela que por debajo del punto de inflexión del 8% de deshidratación del hormigón, se debe a la rápida formación de los hidratos C-S-H, que disminuye la cantidad de agua en los poros por la autodesecación y la formación de hidratos que

llenar los espacios entre los sólidos. Por encima del 8% la conductividad depende de la evolución interna de C-S-H y de la tortuosidad de la matriz de los hidratos. El incremento de la tortuosidad permite el aumento de la distancia en la transferencia iónica (42).

De los dos tipos de corrosión el que más importancia en esta tesis posee es el de corrosión generalizada, que se relaciona con los temas estudiados, como la carbonatación, permeabilidad y retracción.

#### **2.5.5. ESTUDIO DEL PROCESO CORROSIVO EN HORMIGONES.**

Para los métodos de estudio podemos destacar el trabajo con viguetas y traviesas de hormigón realizado por J. Sarriá (43) recogido en su tesis y el de la evaluación de la corrosión en la rehabilitación de vigas corroídas con fibras y resina realizado por S. Masoud (26).

S. Masoud (26) empleó métodos internos y externos de medición de probetas. De manera interna con celdas de medición que se introducían y se sellaban con resinas, y que medían el potencial mientras las probetas eran expuestas a la corrosión. Las de carácter externo fueron realizadas por el instrumento de medida galvánica. Éste aparato determina sin destruir la pieza, el potencial y el factor de corrosión de las barras de acero embebidas. Las medidas de corrosión mediante el medidor de pulso galvánico favorece el estudio en la longitud de la pieza, con distintas posiciones.

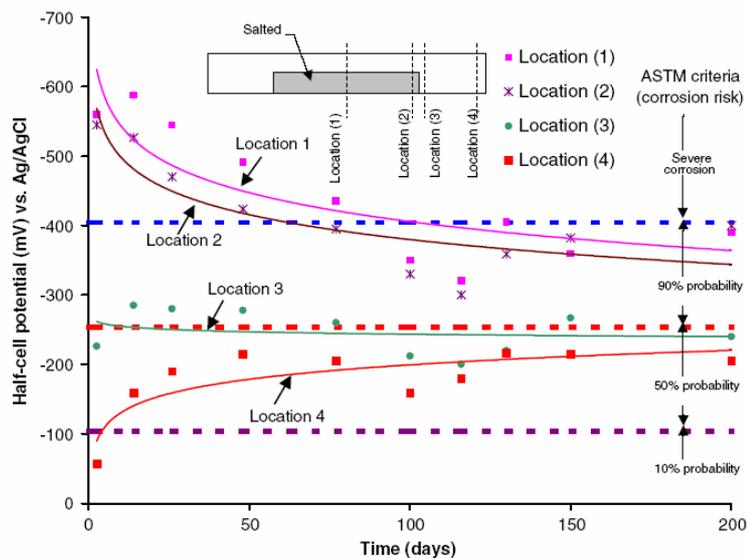


Fig. 7. Half-cell potential measurements using GalvaPulse.

*Fig.2.37. Gráfico de medidas del potencial corrosivo en distintas localizaciones de las vigas empleando el pulsímetro galvánico. En la parte superior se ve la sección esquematizada de la viga, marcada con una zona gris que ha sido sometida a corrosión acelerada con un terminal catódico (26).*

Las medidas realizadas en vigas reparadas con resinas y fibras después de corroídas desvelaron una reducción de la pérdida de masa de acero de sus barras con respecto a aquellas que no fueron rehabilitadas hasta en un 16% después de 152 días de corrosión acelerada. Las láminas compuestas de fibras de vidrio fueron más efectivas que las de carbono empleadas normalmente como refuerzo estructural.

J. Sarriá (43) estudió la resistividad de los hormigones que protegían las barras de acero midiendo las Icorr o intensidad de corrosión del metal, en relación con la temperatura y la humedad, los ciclos noche y día y anuales. Determinó que no existe relación directa entre la humedad relativa o la temperatura y la velocidad de corrosión, depende más del grado de saturación del hormigón. Las medidas de Icorr se obtuvieron en épocas calurosas después de lluvias.

Las fisuras de hasta 1 mm en hormigones de buena calidad no presentan un riesgo adicional de corrosión en ataques a causa de la carbonatación. No obstante en el caso de ataque por cloruros éste afecta en cualquier ancho de fisura, aspecto este importante en ambientes marinos que nos afectan en Canarias. La corrosión permanece

activa en situaciones de aplicación continua de éstos, en caso contrario las fisuras autocicatrizan y se detiene la corrosión (43).

En este aspecto debemos tener en cuenta lo mencionado en el artículo de G.R. Meira (16), expuesto anteriormente también, en el que se destaca la acción del aerosol marino en los primeros metros de orilla, alcanzando grandes distancias por efecto de viento hacia el interior. Es interesante medir la deposición de cloruros secos en estructuras expuestas a ambiente marino, como en la figura expuesta a continuación.

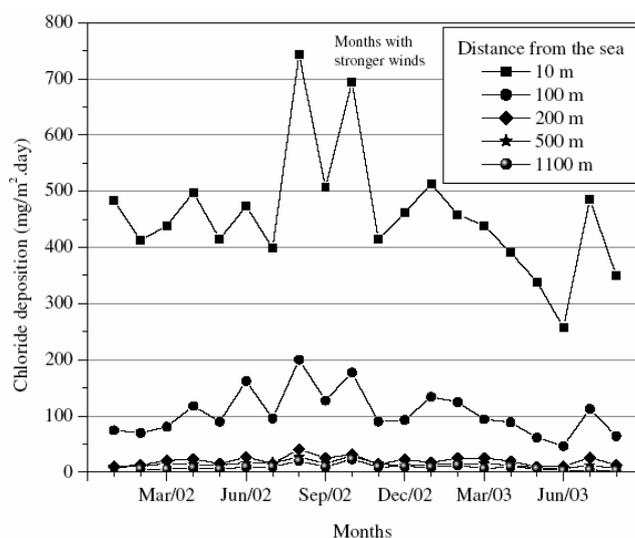


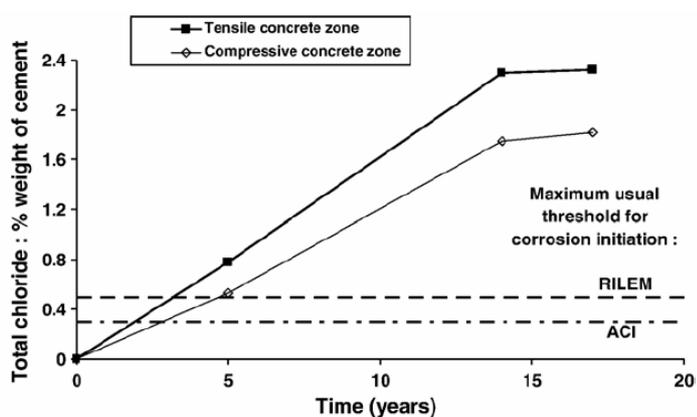
Fig. 2.38. Gráfica de deposición de cloruros a lo largo de un año en estaciones de medida a distintas distancias del mar (16).

Se observa la bajada exponencial en la cantidad de sales marinas en las muestras extraídas con la distancia del mar, y la influencia del viento en la cantidad y lejanía alcanzada por estas sales.

No existe una relación directa entre la concentración superficial de cloruros y la cantidad de éstos que penetra en el hormigón. En concentraciones bajas en superficie se facilita la entrada de cloruros, aunque a mayor cantidad de cloruros entraran mayor cantidad pero hasta un límite en el que se ralentiza el proceso al llegar a saturar los poros de entrada (16). El proceso de entrada del ión cloro se rige por la ya mencionada fórmula de la raíz cuadrada del tiempo.

Según T.J. Kirkpatrick (62) el tiempo en que comienza la corrosión es más sensible al coeficiente de difusión que al recubrimiento. Para recubrimientos por encima de 3.8 mm la relación del tiempo de inicio de la corrosión con el incremento de la profundidad de protección posee una relación lineal en función de otras variables. El comienzo de la corrosión en hormigones con coeficientes de difusión por debajo de  $10\text{mm}^2/\text{año}$  aumenta en medida no lineal con respecto a aquellos por encima de  $30\text{mm}^2/\text{año}$ .

El estudio realizado por T. Vidal (37) apunta que el ancho de la fisura no parece influir en el proceso de entrada de cloruros, estableciendo un ancho de fisura mínimo de 0.3 mm a partir del cual se produce este proceso, siendo más importante la tensión en el acero que la fisuración del hormigón. También establece que existe una diferencia de concentración de cloruros en zonas a tracción y a compresión. La segregación de hormigones es una causa importante de la desunión de la interfase, permitiendo una propagación temprana de la corrosión de las barras situadas en zonas a compresión en comparación con barras a tracción en vigas a flexión.



*Fig.2.39. Gráfica de contenido total de cloruros en la zona de la barra de las muestras (16 mm) en las zonas corroídas a compresión o a tracción de las vigas corroídas en el tiempo (37).*

El empleo de adiciones puzolánicas en el control de la retracción y de la corrosión ha sido estudiado por L. Jiang (54), con grandes cantidades de cenizas volantes, consiguiendo mejoras en el control de la corrosión en probetas con un 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 5% de HCl.

# CAPÍTULO 3

## MEJORA EN LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS CANARIOS

### 3.1. PROGRAMA DE ENSAYOS

#### 3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS EMPLEADOS.

A continuación se acompañan las características de dos de los tipos de cemento puzolánico empleados en Canarias. Para esta tesis se ha empleado el cemento puzolánico con denominación comercial “Atlante especial”, con un porcentaje menor de puzolana que el “Jaguar”. El primero es el empleado en edificación en mayor medida y permite la adición posterior de humo de sílice sin perder resistencia mecánica. La sustitución de humo de sílice por un porcentaje de cemento no debe pasar el valor final del 30 % de puzolanas. (6)

		<b>Cemento puzolánico</b>	
		Denominación comercial: <b>Jaguar.</b>	
		Designación: CEM IV / A (P) 32,5 N	
Composición especificaciones	Según UNE-EN 197- 1:2000	Valor real medio	Recomendable para: Obras de hormigón en masa de gran volumen dado su bajo calor de hidratación. Obras en las que se requiere una buena impermeabilidad. Bases y sub-bases de carreteras. Morteros en general especialmente en ambientes moderadamente agresivos, en obras hidráulicas, y hormigones con áridos reactivos.
% Clinker	65/89	70	
% Puzolana	<b>11/35</b>	<b>30</b>	
Puzolanidad 8 D	CUMPLE		
% Máximo SO <sub>3</sub>	3,5		
% Máximo Cl-	0,1		
Expansión máxima.	10 mm		
Principio de Fraguado	>75 min.		No recomendable en hormigones pretensados. Elementos estructurales con gran cuantía de

Final fraguado	< 12 horas.	armadura y/o que precisen desencofrados rápidos.
RESISTENCIA A COMPRESIÓN N/mm2	MIN 2 días	-
	MIN 7 días	16
	MIN 28 días	32,5
	MAX 28 días	52,5
		Precauciones y recomendaciones de uso: Almacenamiento menor de dos meses. Evitar desecaciones bruscas en climas secos y ventosos, prolongando el curado.

Tabla 3.1 .Características cemento puzolánico “Jaguar”, suministrado por Cementos especiales de las Islas “CEISA” (63).

		<b>Cemento Pórtland con puzolana</b>	
		Denominación comercial: <b>Atlante especial.</b>	
		Designación: CEM II / A (P) 32,5 R	
Composición especificaciones	Según UNE-EN 197-1:2000	Valor real medio	Recomendable para: Todo tipo de hormigón armado y en masa. Elementos prefabricados de hormigón con tratamientos hidrotermico higtotérmicos.
% Clinker	80/94	82	
% Puzolana	<b>6/20</b>	<b>18</b>	
Puzolanidad 8 D	CUMPLE		
% Máximo SO3	3,5		
% Máximo Cl-	0,1		
Expansión máxima.	10 mm		No recomendable en hormigones pretensados.
Principio de Fraguado	>75 min.		
Final fraguado	< 12 horas.		
RESISTENCIA A COMPRESIÓN N/mm2	MIN 2D	13,5	Precauciones y recomendaciones de uso: Almacenamiento menor de dos meses. Evitar desecaciones bruscas en climas secos y ventosos, prolongando el curado.
	MIN 7D	-	
	MIN 28 D	32,5	
	MAX 28 D	52,5	

Tabla 3.2 .Características cemento Pórtland con puzolana “Atlante especial”, suministrado por Cementos especiales de las Islas “CEISA” (63).

Según la marca comercial la adición de puzolana es natural, procedente de la cantera de CEISA, en Arguineguín, Gran Canaria.

### 3.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS EMPLEADOS.

El hormigón que se ha empleado en la tesis posee cuatro granulometrías, dos arenas y dos áridos. La caracterización de los áridos empleados ha sido realizada en el laboratorio Readymix Asland S.A. estudiando en cada caso la Granulometría, las condiciones físico-químicas y las condiciones físico-mecánicas.

#### Árido 0/1 mm. (Arena del Sahara)

Granulometría:

	Valores	Especificaciones
Módulo Granulométrico (UNE 7295)	1.64	
Tamiz UNE: 2 mm.	100%	Pasa
Tamiz UNE: 1 mm.	99%	Pasa
Tamiz UNE: 0.5 mm.	74%	Pasa
Tamiz UNE: 0.25 mm.	55%	Pasa
Tamiz UNE: 0.125 mm.	9%	Pasa
Tamiz UNE: 0.063 mm.	0.8%	Pasa

*Tabla 3.3. Resultados de Ensayos de Granulometría de la Arena del Sahara (0/1).*

Condiciones Físico-Químicas:

	Valores	Especificaciones
Terrones de arcilla (UNE 7133)	0%	Máx. 1%
Materia Orgánica (UNE-EN 1744-1)	0%	Ausencia
Contaminantes orgánicos ligeros (UNE 7244 o UNE-EN 1744-1)	0.05%	Máx. 0.5%
Comp. Totales de Azufre (UNE-EN 1744-1)	0.07%	Máx. 1%
Sulfatos Solubles en Ácido (UNE-EN 1744-1)	0.06%	Máx. 0.8%
Equivalente en Arena (UNE-EN 933-8)	93%	Según ambiente
Compuestos de cloro (UNE-EN 1744-1)	0.04%	HA<0.05%,HP<0.03%
Reactividad arido/alcali (UNE 146507-1 y -2)	No Reactivo	No Reactivo

*Tabla 3.4. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas de la Arena del Sahara (0/1).*

Condiciones Físico-Mecánicas:

	Valores	Especificaciones
Friabilidad “micro-Deval” (UNE 83115)	15	Máx. 40
Peso Específico (UNE-EN 1097-6)	2.64 Mg/m <sup>3</sup>	
Contenido de Finos (UNE-EN 933-1)	0.8%	Según ambiente
Absorción (UNE-EN 1097-6)	0.65%	Máx. 5%
Estabilidad en peso (UNE-EN 1367-2)	2.25%	Máx. 15% (MgSO <sub>4</sub> )

*Tabla 3.5. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas de la Arena del Sahara (0/1)*

### Árido 0/5 mm. (Arena ARICAN MACHAQUEO)

Esta arena procede del desecho final del machaqueo de las distintas granulometrías obtenidas en la cantera, es por ello que nos enfrentemos a una arena muy irregular en su granulometría con gran cantidad de finos no controlados.

- Granulometría:

	Valores	Especificaciones
Módulo Granulométrico (UNE 7295)	3.15	
Tamiz UNE: 8 mm.	100%	Pasa
Tamiz UNE: 4 mm.	96%	Pasa
Tamiz UNE: 2 mm.	76%	Pasa
Tamiz UNE: 1 mm.	51%	Pasa
Tamiz UNE: 0.5 mm.	31%	Pasa
Tamiz UNE: 0.25 mm.	19%	Pasa
Tamiz UNE: 0.125 mm.	13%	Pasa
Tamiz UNE: 0.063 mm.	9.2%	Pasa

*Tabla 3.6. Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 0/5mm. (Arena)*

- Condiciones Físico-Químicas:

	Valores	Especificaciones
Terrones de arcilla (UNE 7133)	0%	Máx. 1%
Materia Orgánica (UNE-EN 1744-1)	0%	Ausencia
Contaminantes orgánicos ligeros (UNE 7244 o UNE-EN 1744-1)	0%	Máx. 0.5%
Comp. Totales de Azufre (UNE-EN 1744-1)	0.08%	Máx. 1%
Sulfatos Solubles en Ácido (UNE-EN 1744-1)	0.07%	Máx. 0.8%
Equivalente en Arena (UNE-EN 933-8)	75%	Según ambiente

Compuestos de cloro (UNE-EN 1744-1)	0.015%	HA<0.05%,HP<0.03%
Reactividad arido/alkali (UNE 146507-1 y -2)	No Reactivo	No Reactivo

*Tabla 3.7. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 0/5mm. (Arena).*

- Condiciones Físico-Mecánicas:

	Valores	Especificaciones
Friabilidad “micro-Deval” (UNE 83115)	12	Máx. 40
Peso Específico (UNE-EN 1097-6)	2.48 Mg/m <sup>3</sup>	
Contenido de Finos (UNE-EN 933-1)	9.2%	Según ambiente
Absorción (UNE-EN 1097-6)	2.7%	Máx. 5%
Estabilidad en peso (UNE-EN 1367-2)	3.15%	Máx. 15% (MgSO <sub>4</sub> )

*Tabla 3.8. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 0/5mm. (Arena)*

### Árido 5/10 mm.

- Granulometría:

	Valores	Especificaciones
Módulo Granulométrico (UNE 7295)	6.23	
Tamiz UNE: 12.5 mm.	100%	Pasa
Tamiz UNE: 10 mm.	95%	Pasa
Tamiz UNE: 8 mm.	66%	Pasa
Tamiz UNE: 6.3 mm.	29%	Pasa
Tamiz UNE: 5 mm.	8%	Pasa
Tamiz UNE: 4 mm.	3%	Pasa
Tamiz UNE: 2 mm.	2%	Pasa
Tamiz UNE: 1 mm.	1%	Pasa

*Tabla 3.9. Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 5/10mm.*

- Condiciones Físico-Químicas:

	Valores	Especificaciones
Terrones de arcilla (UNE 7133)	0%	Máx. 0.25%
Contaminantes orgánicos ligeros (UNE 7244 o UNE-EN 1744-1)	0%	Máx. 1%
Comp. Totales de Azufre (UNE-EN 1744-1)	0.09%	Máx. 1%
Sulfatos Solubles en Ácido (UNE-EN 1744-1)	0.07%	Máx. 0.8%
Compuestos de cloro (UNE-EN 1744-1)	0.01%	HA<0.05%,HP<0.03%
Reactividad arido/alcali (UNE 146507-1 y -2)	No Reactivo	No Reactivo
Partículas Blandas (UNE 7134)	0.4%	Máx. 5%

*Tabla 3.10. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 5/10mm.*

- Condiciones Físico-Mecánicas:

	Valores	Especificaciones
Peso Específico (UNE-EN 1097-6)	2.60 Mg/m <sup>3</sup>	
Contenido de Finos (UNE-EN 933-1)	1.4%	Según ambiente
Absorción (UNE-EN 1097-6)	0.95%	Máx. 5%
Estabilidad en peso (UNE-EN 1367-2)	2.45%	Máx. 18% (MgSO <sub>4</sub> )
Desgaste de “Los Angeles” (UNE-EN 1097-2)	13	Máx. 40
Coefficiente de forma (UNE 7238)	0.10	Máx. 0.20
Índice de Lajas (UNE-EN 933-3)	23	Inferior a 35

*Tabla 3.11. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 5/10mm.*

### **Árido 10/20 mm.**

- Granulometría:

	Valores	Especificaciones
Módulo Granulométrico (UNE 7295)	7.06	
Tamiz UNE: 25 mm.	100%	Pasa
Tamiz UNE: 20 mm.	99%	Pasa
Tamiz UNE: 16 mm.	85%	Pasa
Tamiz UNE: 14 mm.	66%	Pasa
Tamiz UNE: 12.5 mm.	50%	Pasa
Tamiz UNE: 10 mm.	13%	Pasa
Tamiz UNE: 8 mm.	3%	Pasa
Tamiz UNE: 6.3 mm.	1%	Pasa

*Tabla 3.12. Resultados de Ensayos de Granulometría del Árido 10/20mm.*

- Condiciones Físico-Químicas:

	Valores	Especificaciones
Terrones de arcilla (UNE 7133)	0%	Máx. 0.25%
Contaminantes orgánicos ligeros (UNE 7244 o UNE-EN 1744-1)	0%	Máx. 1%
Comp. Totales de Azufre (UNE-EN 1744-1)	0.09%	Máx. 1%
Sulfatos Solubles en Ácido (UNE-EN 1744-1)	0.07%	Máx. 0.8%
Compuestos de cloro (UNE-EN 1744-1)	0.01%	HA<0.05%,HP<0.03%
Reactividad arido/alcali (UNE 146507-1 y -2)	No Reactivo	No Reactivo
Partículas Blandas (UNE 7134)	0%	Máx. 5%

*Tabla 3.13. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Químicas del Árido 10/20mm.*

- Condiciones Físico-Mecánicas:

	Valores	Especificaciones
Peso Específico (UNE-EN 1097-6)	2.60 Mg/m <sup>3</sup>	
Contenido de Finos (UNE-EN 933-1)	0.9%	Según ambiente
Absorción (UNE-EN 1097-6)	0.75%	Máx. 5%
Estabilidad en peso (UNE-EN 1367-2)	2.45%	Máx. 18% (MgSO <sub>4</sub> )
Desgaste de “Los Angeles” (UNE-EN 1097-2)	13	Máx. 40
Coeficiente de forma (UNE 7238)	0.17	Máx. 0.20
Índice de Lajas (UNE-EN 933-3)	17	Inferior a 35

*Tabla 3.14. Resultados de Ensayos de Condiciones Físico-Mecánicas del Árido 10/20mm.*

### **3.1.3. DOSIFICACIONES EMPLEADAS EN LA TESIS.**

Las distintas dosificaciones se han realizado partiendo de una principal denominada tipo, aportada por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas en su dilatado trabajo con hormigones en su laboratorio.

Se trata de una dosificación para obtener un valor característico de  $290 \text{ Kg/cm}^2$ , empleando los áridos descritos en el apartado anterior.

Las distintas dosificaciones se han obtenido incorporando o sustituyendo componentes para una mejora concreta y estudiando posteriormente la incidencia de estas adiciones en aspectos de segundo grado para dicho elemento. Las adiciones empleadas son las microfibras de polipropileno, el humo de sílice o microsílíce, y superplastificantes para mejorar la reología de los hormigones.

Se han incorporado microfibras de polipropileno con la intención de controlar la fisuración final de la masa en el proceso de fraguado y curado de la masa (2.3.1.2). La mejora de la fisuración con estas fibras cortas podía acarrear consecuencias no deseadas como la mayor sequedad de la masa y por lo tanto una peor trabajabilidad según las referencias leídas, y una mejora en la resistencia a flexión y a impacto.

Se ha adicionado humo de sílice para aumentar la resistencia y mejorar las características químicas de la masa, observando la incidencia posterior en otros parámetros, tales como la compacidad y la permeabilidad de la masa. El empleo de esta adición se debe a que el tamaño de éste inferior al cemento puede mejorar la compacidad según los estudios a los que se ha hecho referencia (2.3.2.1). El factor negativo del empleo de este material es el de la baja trabajabilidad de la masa debido a la finura de este elemento requiriendo mayores cantidades de agua.

La incorporación de estos elementos tanto por separado como en conjunto exige la adición de superplastificantes que mantuvieran unas cantidades de agua razonables sin perjudicar el vertido y trabajo con el hormigón.

Por otro lado, diversos autores apuntaban a la sinergia entre materiales. Por un lado se pueden mejorar varios factores a la vez, mientras que por otro conseguir mejorar algún factor más de forma secundaria o no intencionada.

### 3.1.3.1 Hormigón tipo:

#### A. SERIE H.T.1.:

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.609

*Tabla 3.15. Dosificación de hormigón tipo.*

### 3.1.3.2 Hormigón tipo con reducción de agua:

#### B. SERIE H.T.2.:

Dosificación del Hormigón Canario de Control o de Referencia.	
CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	160 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.5
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	1.28 kg/m <sup>3</sup>
Relación en peso superplastificante/cemento	0.4 %

*Tabla 3.16. Dosificación de hormigón relación a/c 0.5.*

### 3.1.3.3. Hormigones con microfibras de polipropileno:

#### C. SERIE H.F.1. 300.

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.609
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	0.300 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	1.92 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.033 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.6 %

*Tabla 3.17. Dosificación de hormigón tipo con 0.300 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6.*

#### D. SERIE H.F.1. 600.

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.609
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	0.600 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	1.92 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.066 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.6 %

*Tabla 3.18. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6.*

**E. SERIE H.F.2. 600.**

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	176 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.55
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	0.600 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	1.92 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.066 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.6 %

*Tabla 3.19. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55.*

**F. SERIE H.F.1. 900.**

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.6
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	0.900 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.08 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.099 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.65 %

*Tabla 3.20 Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6.*

### G. SERIE H.F.2. 900.

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	176 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.55
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	0.900 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.24 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.099 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.70 %

*Tabla 3.21. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55.*

### H. SERIE H.F.1. 1200.

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.6
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	1.200 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.24 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.132 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.70 %

*Tabla 3.22. Dosificación de hormigón tipo con 1.200 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.6.*

### I. SERIE H.F.2. 1200.

CEM II / B-P 32,5 R	320 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	176 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.55
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	1.200 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.24 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.132 %
Relación en peso superplastificante/cemento	0.70 %

*Tabla 3.23. Dosificación de hormigón tipo con 1.200 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno, a/c 0.55.*

#### 3.1.3.4. Hormigones con humo de sílice o microsílíce:

### J. SERIE H.S.1.

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	195 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.6
Humo de sílice/Microsílíce	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.08 kg/m <sup>3</sup>
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	0.65 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %

*Tabla 3.24. Dosificación de hormigón tipo con 10 % de Humo de Sílice a/c 0.6.*

**3.1.3.5. Hormigones con combinación de microfibra de polipropileno y humo de sílice:**

**K. SERIE H.S.2.**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	176 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.55
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.56 kg/m <sup>3</sup>
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	0.80 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %

*Tabla 3.25. Dosificación de hormigón tipo con 10 % de Humo de Sílice a/c 0.55.*

**L. SERIE H.S.F.1. 600**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	192 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.60
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.56 kg/m <sup>3</sup>
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	600 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.066 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	0.80 %

*Tabla 3.26. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.60.*

**M. SERIE H.S.F.2. 600**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	160 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.50
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.88 kg/m <sup>3</sup>
Fibra (19 mm)Polipropileno (P.P.)	600 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.066 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	0.90 %

*Tabla 3.27. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.50.*

**N. SERIE H.S.F.3. 600**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	128 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.40
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	3.84 kg/m <sup>3</sup>
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	600 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.066 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	1.20 %

*Tabla 3.28. Dosificación de hormigón tipo con 0.600 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.50.*

**O. SERIE H.S.F.1. 900**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	192 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.60
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	2.65 kg/m <sup>3</sup>
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	900 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.099 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	0.83 %

*Tabla 3.29. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.60.*

**P. SERIE H.S.F.2. 900**

CEM II / B-P 32,5 R	288 kg/m <sup>3</sup>
Arena del Sahara 0/1	326 kg/m <sup>3</sup>
Árido 0/5	489 kg/m <sup>3</sup>
Árido 5/10	382 kg/m <sup>3</sup>
Árido 10/20	623 kg/m <sup>3</sup>
Agua	176 kg/m <sup>3</sup>
Relación Agua/Cemento	0.55
Humo de sílice/Microsílice	32 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante/reductor de agua de alta actividad.	3.20 kg/m <sup>3</sup>
Fibra (19 mm) Polipropileno (P.P.)	900 kg/m <sup>3</sup>
Volumen de fibras en fracción volumétrica	0.099 %
Porcentaje de sustitución H.S./cemento	10 %
Relación en peso superplastificante/cemento + H.S	1.00 %

*Tabla 3.30. Dosificación de hormigón tipo con 0.900 kg/m<sup>3</sup> de fibra (19 mm) polipropileno y 10 % de Humo de Sílice a/c 0.55.*

### 3.1.4. PLAN DE ENSAYOS.

El plan de ensayos plantea una serie de pruebas de laboratorio, tanto al hormigón original o de partida como al de adiciones. De esta manera se consigue establecer comparativas entre los distintos hormigones, tanto en su comportamiento físico o mecánico, y en su comportamiento químico posterior.

El plan de ensayos se establece en este trabajo con probetas de hormigón en todas sus fases de formación y endurecimiento, hasta incluso realizar estudios a largo plazo, en concreto, dos años de determinados valores de degradación física y química.

Ensayos Físicos					
DOSIFICACIÓN	CONSISTENCIA	ULTRASONIDOS	DENSIDAD	RETRACCIÓN	MICROSCOPIA
	fresco	7/28 días	7/28 días	Fresco/1 día	2 años
<b>H TIPO</b>	3(ABRAMS)	12	12	3	1
<b>H. CON MICROFIBRAS</b>	3 (VEBE)	12	12	3	1
<b>H. CON MICROSÍLICE</b>	3 (ABRAMS Y VEBE)	12	12	3	1
<b>H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE</b>	3 (VEBE)	12	12	3	1

Ensayos Físicos		
DOSIFICACIÓN	PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN	FISURACIÓN
<b>H TIPO</b>	3	2
<b>H. CON MICROFIBRAS</b>	3	3
<b>H. CON MICROSÍLICE</b>	3	3
<b>H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE</b>	3	3

Tabla 3.31. Tabla de ensayos físicos.

Ensayos Mecánicos			
DOSIFICACIÓN	COMPRESIÓN SIMPLE	TRACCIÓN (BRASILEÑO)	FLEXIÓN
H TIPO	12	12	3
H. CON MICROFIBRAS	12	9	3
H. CON MICROSÍLICE	12	12	3
H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE	12	9	3

*Tabla 3.32. Tabla de ensayos mecánicos.*

Ensayos Químicos			
DOSIFICACIÓN	ALCALINIDAD	CARBONATACIÓN	DURABILIDAD
H TIPO	3	3	3
H. CON MICROFIBRAS	3	3	3
H. CON MICROSÍLICE	3	3	3
H. MICROFI. + HUMO DE SÍLICE	3	3	3

*Tabla 3.33. Tabla de ensayos químicos.*

## 3.2. MEJORA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.

### 3.2.1. MECÁNICA DE LOS HORMIGONES AVANZADOS CANARIOS.

#### 3.2.1.1. Consistencias de las distintas series.

Los valores de las consistencias de las distintas series se obtuvieron mediante el empleo del cono de Abrams, relleno en tongadas y con golpeo manual de barra de acero en cada una, según la norma UNE 83313.

Después de depositada la masa en el cono metálico se mide el descenso con respecto a la original. Se puede observar en la siguiente imagen como en el caso de hormigones con fibras el descenso era nulo debido a su morfología, siendo necesario el empleo del consistómetro Vebe.



*Fig. 3.1. Vista del cono de Abrams y de la medida del descenso. Esta imagen corresponde a un hormigón con microfibras cuyo descenso es nulo como se ha comentado.*

El empleo del consistómetro Vebe es el siguiente. Se incorpora la masa en un cono como el de Abrams de la misma manera que en el sistema ya explicado. Se coloca sobre una mesa vibratoria, se desmolda y se tapa la parte superior con un metacrilato. Se pone en funcionamiento la base y se mide el tiempo que tarda en descender y colmatarse

la tapa de metacrilato de lechada de cemento. En base a este tiempo se determina la consistencia del hormigón, según la norma UNE 83.314.



*Fig. 3.2. Imagen del consistómetro Vebe con probeta para su ensayo posterior.*

A continuación se presentan los resultados en centímetros en las probetas de hormigón tipo ensayadas con cono de Abrams y en segundos para aquellas realizadas con el cono Vebe.

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESULTADO</b> Descenso (cm)	<b>CONSISTENCIA</b>	<b>MEDIA</b> Descenso (cm)
Serie 1	6.5 cm	Blanda	<b>6.0</b>
Serie 2	6.0 cm	Blanda	
Serie 3	4.5 cm	Blanda	
Serie 4	5.5 cm	Blanda	
Serie 5	6.0 cm	Blanda	
Serie 6	6.0 cm	Blanda	
Serie 7	6.0 cm	Blanda	

*Tabla 3.34. Resultados Ensayo del Cono de Abrams Hormigón de Control.*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>TIEMPO (s)</b>	<b>CONSISTENCIA</b>
Serie H.F.1.-300	10	Seca
Serie H.F.1.-600	9	Blanda
Serie H.F.2.-600	9	Blanda
Serie H.F.1.-900	12	Seca
Serie H.F.2.-900	11	Blanda
Serie H.F.1.-1200	10	Seca
Serie H.S.1.	9	Blanda
Serie H.S.2.	10	Seca
Serie H.S.F.1-600	15	Muy Seca
Serie H.S.F.2-600	15	Muy Seca
Serie H.S.F.1-900	14	Seca
Serie H.S.F.2-900	14	Seca

*Tabla 3.35. Resultados Ensayo del Cono Vebe en Hormigones mejorados.*

Podemos observar los hormigones con adición de microfibra requieren mayor cantidad de superplastificante para mantener consistencias válidas para el trabajo. Lo mismo sucede con la adición de humo de sílice en la masa del hormigón. No obstante en algunos casos incluso con la adición de superplastificantes no se han conseguido consistencias blandas.

Son por tanto dosificaciones, especialmente las que combinan microfibras de polipropileno con humo de sílice, que requerirán un mayor esfuerzo en la puesta en obra, con tiempos altos de vibrado y mayor control posterior de segregación y coqueras.

Es por ello que se deba replantear su empleo en pilares de gran altura o piezas con difícil control del vibrado o formas geométricas complicadas, así como en edificios en altura. No obstante en prefabricados y elementos de control exhaustivo incluso las más secas pueden tener control.

### 3.2.1.2. Resistencia a compresión.

En las series de probetas se establece en primer lugar la resistencia base de la dosificación tipo, para controlar posteriormente en el resto de probetas que la adición de estos elementos no perjudicaba de alguna forma.

Los resultados que se presentan a continuación son realizados mediante prensa hidráulica con rotura a compresión de probetas tanto cúbicas como cilíndricas, siguiendo la siguiente tabla de valores de conversión:

Tipo de probeta	Dimensión cm	Coeficiente de conversión de probeta cilíndrica de 15x30 cm <sup>2</sup>	
		Límites de variación	Valores medios
Cilindro	15x30	-	1,00
Cilindro	10x20	0,94 a 1,00	0,97
Cilindro	25x50	1,00 a 1,10	1,05
<b>Cubo</b>	<b>10</b>	<b>0,70 a 0,90</b>	<b>0,80</b>
<b>Cubo</b>	<b>15</b>	<b>0,70 a 0,90</b>	<b>0,80</b>
Cubo	20	0,75 a 0,90	0,83
Cubo	30	0,80 a 1,00	0,90
Prisma	15x15x45	0,90 a 1,20	1,05
Prisma	20x20x60	0,90 a 1,20	1,05

*Tabla 3.36. Valores de conversión entre probetas sometidas a compresión. Se han empleado probetas cúbicas de 15x15 cm, por lo que el coeficiente de conversión será de 0,80.*



*Fig. 3.3. Imagen de ensayo de rotura de probeta cilíndrica de medidas 15x30 cm. a compresión.*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN 7 días (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN 28 días (MPa)</b>
Serie 1	13.3	23.7
Serie 2	23.80	34.60
Serie 3	18.70	34.90
Serie 4 (cúbica)	17.2	24.00
Serie 5	20.60	31.10
Serie 6	18.60	30.40
MEDIA	18.70	29.78

*Tabla 3.37 Resultados Ensayo mecánico a compresión de probetas de series de hormigón tipo con relación de a/c 0.60 (H.T.2).*

NUMERO DE SERIE	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN
	7 días (MPa)	28 días (MPa)
Serie H.F.1.-300	13.4	29.50
Serie H.F.1.-600	15.20	28.90
Serie H.F.2.-600	17.5	31.50
Serie H.F.1.-900	12.00	27.90
Serie H.F.2.-900	14.10	29.20
Serie H.F.1.-1200	10.00	26.80
Serie H.S.1.	22.5	41.50
Serie H.S.2.	21.2	39.25
Serie H.S.F.1-600	14.60	43.15
Serie H.S.F.2-600	16.7	46.55
Serie H.S.F.1-900	13.2	41.35
Serie H.S.F.2-900	15.4	45.20
Serie H.T.2	19.75	39

Tabla 3.38. Resultados Ensayo mecánico a compresión de probetas de series de hormigón avanzados.

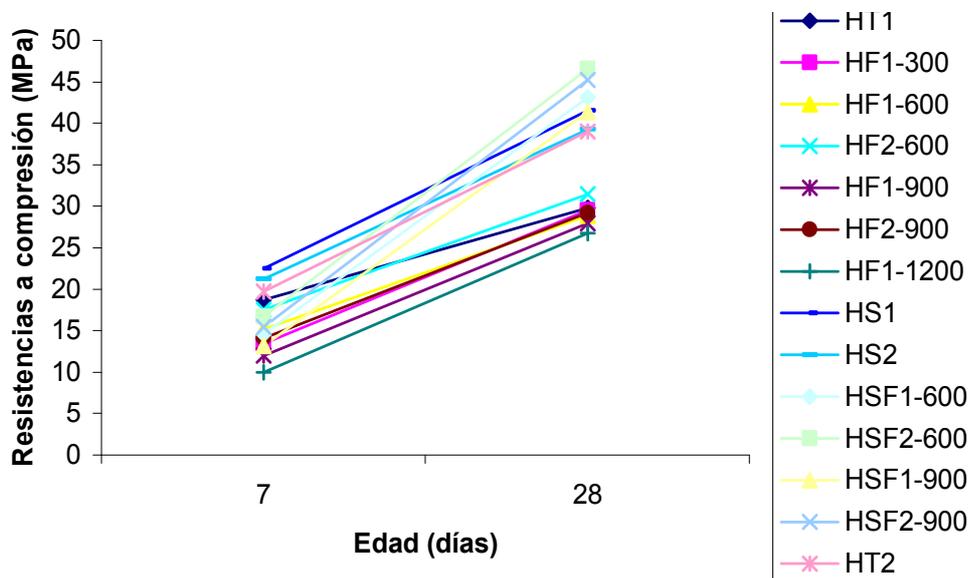


Fig. 3.4. Gráfica de resistencia a compresión de las distintas series pasados 7 y 28 días.

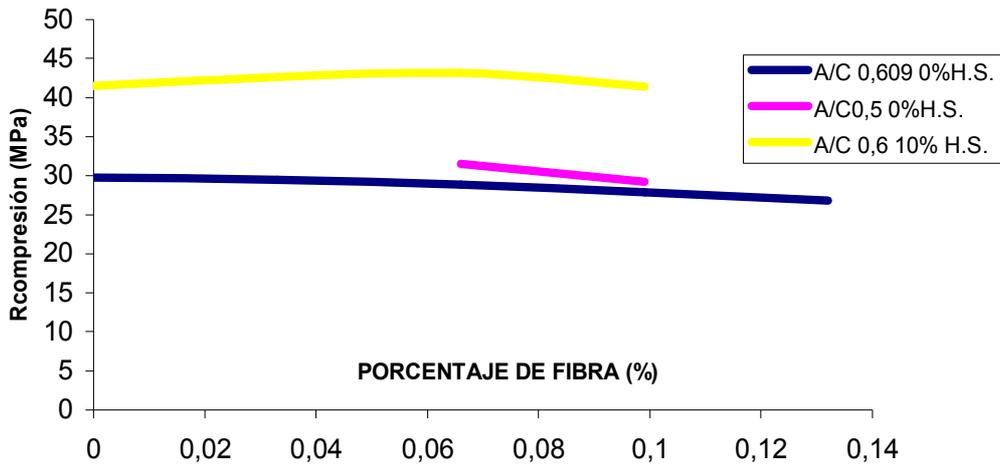


Fig. 3.5. Gráfica de relación de resistencias a compresión y porcentaje de fibras de las distintas series pasados 28 días.

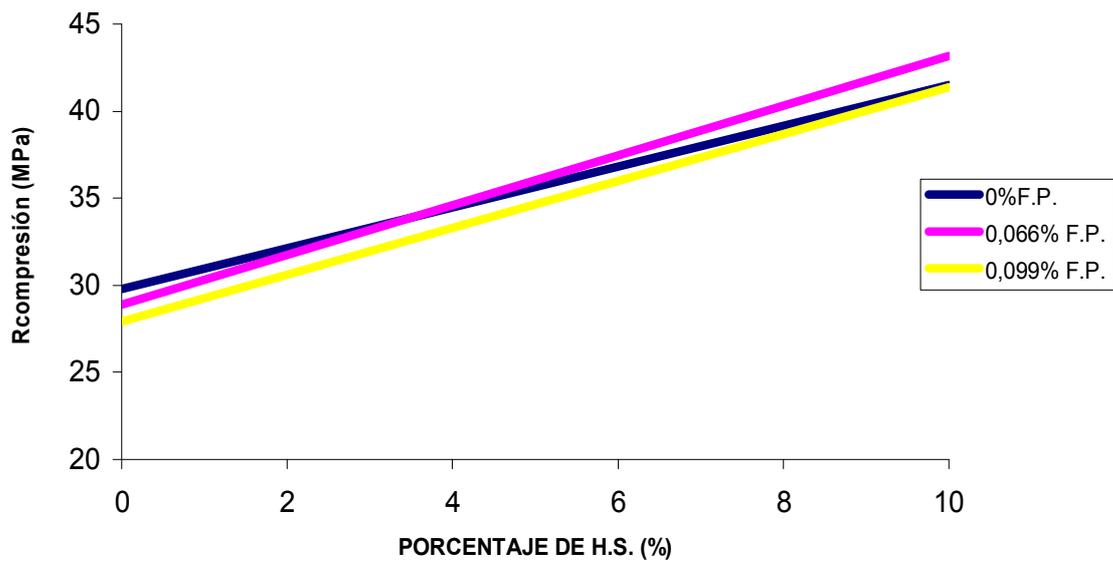
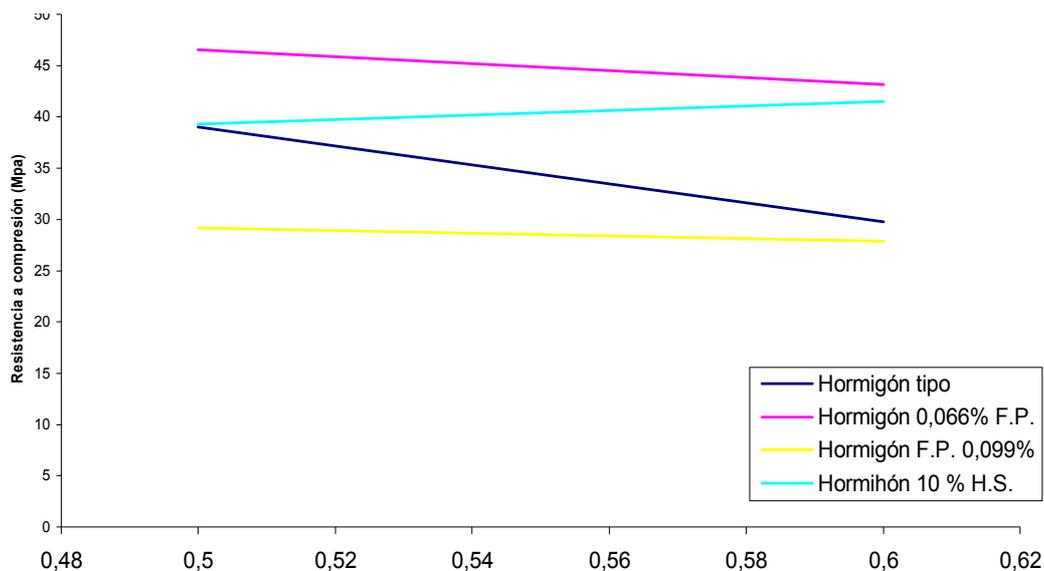


Fig.3.6. Gráfica de relación de resistencias a compresión y porcentaje de Humo de Sílice en las distintas series según porcentaje de fibras con relación a/c constante de 0,609.



*Fig.3.7. Gráfica de relación de resistencias a compresión y relación a/c de las distintas series de hormigón avanzado.*

El aumento en la resistencias de 7 a 28 días está presente en todas las series, llegando en las de hormigón tipo a un sesenta y dos por ciento del valor final a los siete días.

Se aprecia que la inclusión de fibra en el hormigón produce un pequeño descenso en algún caso de las resistencias a veintiocho días, no obstante en estos casos la pendiente de la evolución de resistencias también ha disminuido. Se debe por tanto realizar ensayos pasados 64 días para ver si es en ese periodo más prolongado en el que consigan valores similares a los de partida. Este descenso se corresponde con probetas de consistencia seca, como vimos en el apartado anterior, que pueden haber sufrido problemas de segregación o mala compactación de la masa fresca.

En el momento de la rotura, estas probetas con fibras se encontraban húmedas aún en su masa interior, consiguiendo una retención del agua de curado mayor que el resto.

En cambio la inclusión de humo de sílice mejoró las resistencias tanto finales como iniciales hasta en un 39%, apreciándose una leve aceleración en el proceso de endurecimiento de las probetas. Este aspecto se repitió en las probetas con reducción de agua en su masa que consiguieron aumentos del 31 %.

Las probetas con combinación de humo de sílice y microfibras de polipropileno en su masa son las que han conseguido unos valores mayores de aumentos de resistencia hasta un 56%. En los primeros días de endurecimiento poseen valores normales, aumentando con una mayor celeridad en el proceso posterior.

En ensayos a compresión se observó como la rotura de las probetas con fibras era menos frágil, sin marcar los característicos conos de rotura a 45 grados, encontrándose en cierta manera zunchadas por la fibra.

En general las resistencias aumentaron con el descenso en la relación A/C como era de esperar.



*Fig.3.8. Imagen de probetas con microfibras ensayadas a compresión.*

### 3.2.1.3. Resistencia a tracción.

El ensayo a tracción de las probetas fue realizado mediante el método brasileño, disponiendo la probeta en horizontal para que fracture debido a tensiones transversales a las que se somete la pieza.

$$R_{ti} = 2P/\pi DL$$

$R_{ti}$ , Resistencia a tracción indirecta en MPa.

P, carga a compresión sobre la probeta en N.

D, el diámetro de la probeta en mm.

L, la longitud de la probeta en mm.

*For.3.1. Fórmula de cálculo de la tensión horizontal a tracción, resistencia a tracción indirecta (1).*



*Fig.3.9. Rotura de probeta cilíndrica de medidas 15x30 cm. dispuesta en horizontal mediante método brasileño en prensa hidráulica.*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA 7 días (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA 28 días (MPa)</b>
Serie 1	2.0	2.0
Serie 2	2.1	3.6
Serie 3	2.0	3.10
MEDIA	2.0	2.9

*Tabla 3.39 Resultados ensayo mecánico a tracción mediante método brasileño de probetas cilíndricas de hormigón tipo con relación de A/C 0.60 (H.T.2).*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA 7 días (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA 28 días (MPa)</b>
Serie H.F.1.-300	1.90	2.9
Serie H.F.1.-600	1.85	2.9
Serie H.F.2.-600	1.90	3.0
Serie H.F.1.-900	1.90	3.1
Serie H.F.2.-900	1.80	3.0
Serie H.F.1.-1200	1.80	3.0
Serie H.S.1.	2.00	3.2
Serie H.S.2.	1.90	3.0
Serie H.S.F.1-600	1.85	3.1
Serie H.S.F.2-600	1.95	3.0
Serie H.S.F.1-900	1.90	3.0
Serie H.S.F.2-900	1.90	3.1
Serie H.T.2	1.80	3.0

*Tabla 3.40. Resultados ensayo mecánico a tracción mediante método brasileño de probetas cilíndricas de hormigones avanzados.*

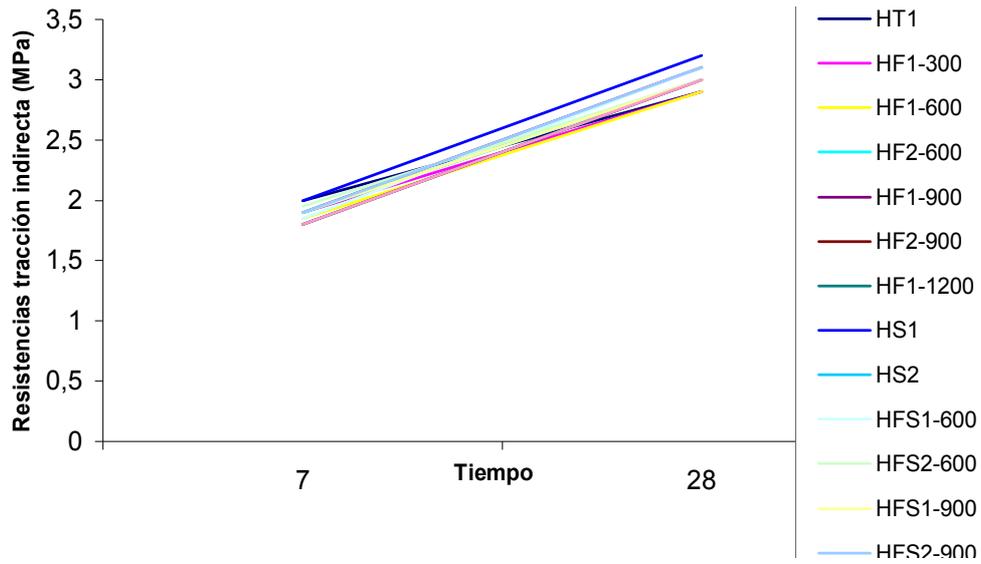


Fig.3.10. Gráfica de resistencias a tracción indirecta de las distintas series pasados 7 y 28 días.

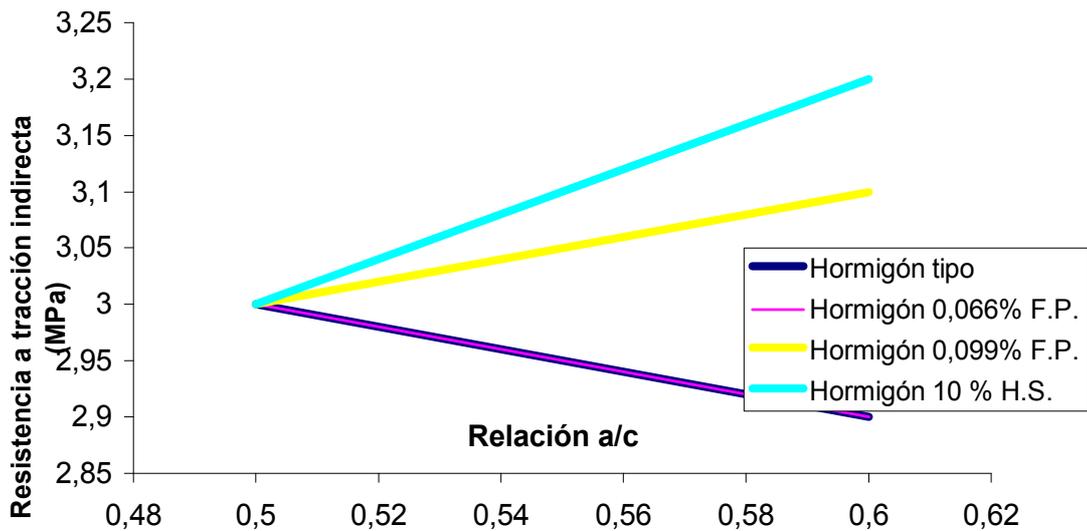


Fig.3.11. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según la relación a/c de las distintas series ensayadas.

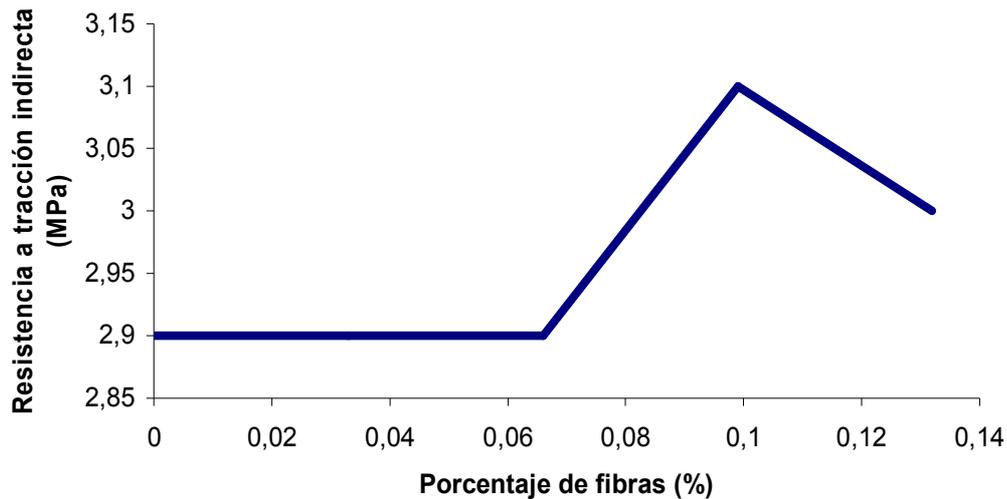


Fig. 3.12. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según los porcentajes de fibra.

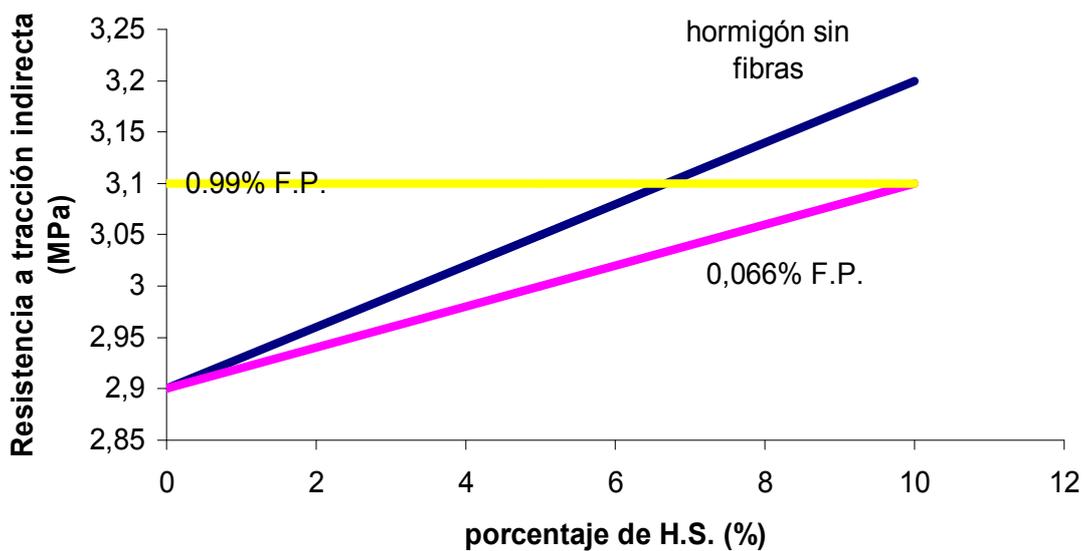


Fig. 3.13. Gráfica de resistencias a tracción indirecta según los porcentajes de Humo de sílice en series con y sin fibra corta de polipropileno.

El aumento de resistencias a tracción se han obtenido de manera más rápida que en los de compresión con el tiempo de curado. Si comparamos la gráfica de resistencias de siete a 28 días podemos apreciar como ya en el séptimo día se alcanza un 70% de la resistencia en los hormigones tipo, un 63% en los hormigones con fibras variando según el porcentaje de fibra añadida, valor similar en adiciones de humo de sílice del 10%, y 61% en combinaciones de ambas adiciones.

El empleo de reductores de agua en las mezclas ha producido valores dispares debido a que el margen de error en valores pequeños es fácil. En hormigones sin fibras y con 0,066% se ha mejorado el comportamiento a tracción con la reducción de agua, no así en series con humo de sílice y con cantidades mayores de fibra. La resistencia a tracción es especialmente sensible a la segregación, ya que el ligante en la masa que es la pasta de cemento debe de llegar a los áridos y envolverlos correctamente.

Las mayores resistencias a tracción indirecta se consiguieron con el hormigón tipo, seguramente por falta de curado en probetas que se encontraron húmedas en el momento de la rotura.

En general los valores de resistencia a tracción indirecta aumentan con la adición de humo de sílice, especialmente en pequeñas cantidades de fibra incorporada. En lo que se refiere a la incorporación de fibra corta de polipropileno y humo de sílice, los valores óptimos se producen en porcentajes de 0,099%, con aumentos del 6% de las resistencias, manteniéndose constantes los valores para el resto de las adiciones.

#### **3.2.1.4. Resistencia a flexión.**

El ensayo a flexión ha sido realizado a tres puntos mediante máquina de carga estática. Las probetas empleadas han sido por un lado prismáticas con medidas de 15x15x45 cm<sup>3</sup>, apoyadas en dos puntos con una luz intermedia de 30 cm, y por otro prismáticas de 4x5x16cm<sup>3</sup> extraídas mediante corte con sierra circular de losas Kraai empleadas en primer lugar para el control de la fisuración siguiendo el mismo proceso que el llevado por Hernandez-Olivares y Barluenga (28). La edad de ensayo de estas probetas es de 24 meses y han sido expuestas a condiciones ambientales.



*Figura 3.14. Imagen de rotura de pieza prismática de hormigón tipo de 15x15x45 cm<sup>3</sup>.  
doblemente apoyada con sensor de desplazamiento.*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESISTENCIA A FLEXIÓN 7 días (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA A FLEXIÓN 28 días (MPa)</b>
Serie 4	3.55	--
Serie 5	5.73	5.79
Serie 6	3.08	5.47
Serie 7	--	5.53
MEDIA	4.12	5.60

*Tabla 3.41. Resultados de rotura por carga estática a flexión de hormigón tipo.*

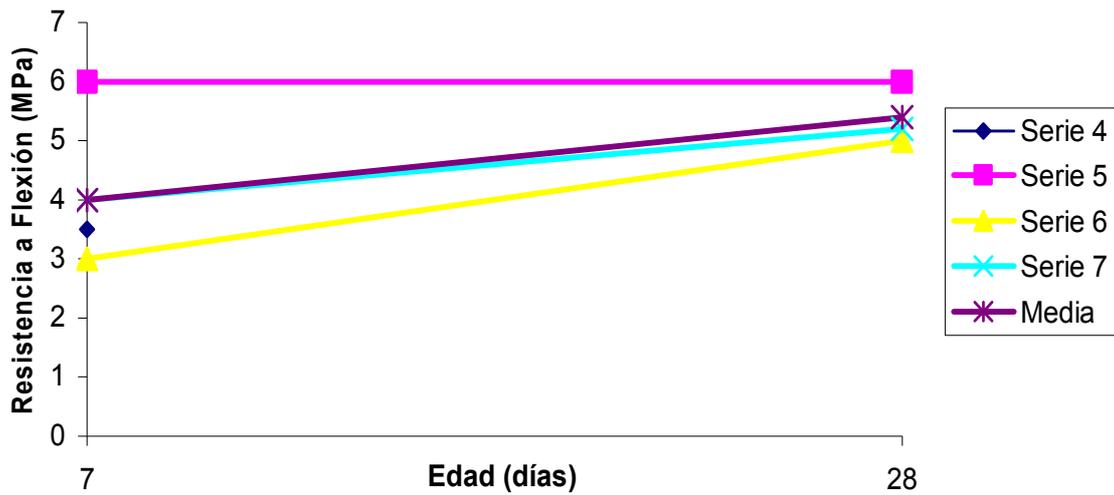


Fig. 3.15. Gráfica de resistencias a flexión de las distintas series de hormigón tipo pasados 7 y 28 días.

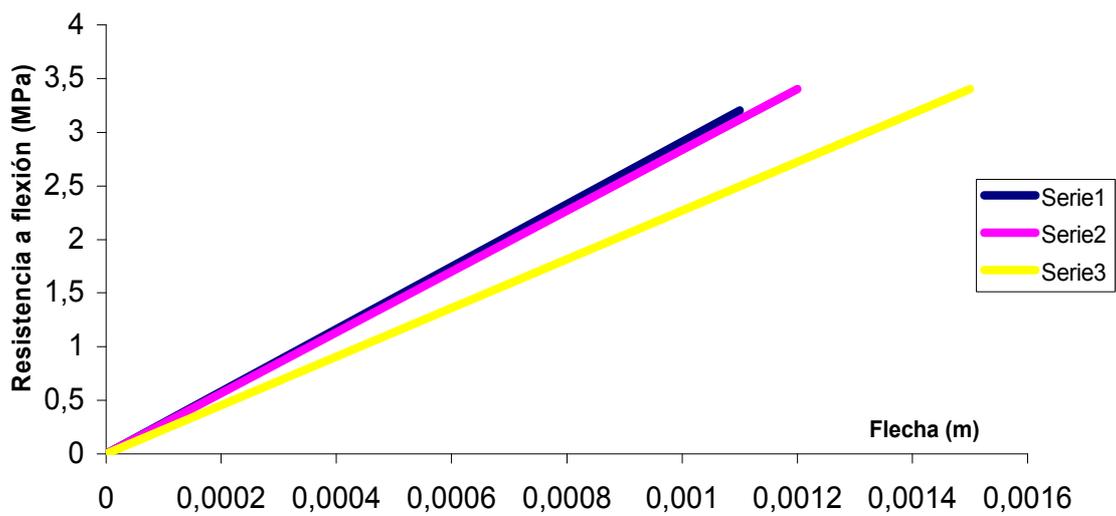


Fig. 3.16 Gráfica resistencia a flexión-flecha en probetas sometidas a flexión de las distintas series de hormigón tipo 28 días obtenidas con probetas de  $15 \times 15 \times 45 \text{ cm}^3$ .

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>RESISTENCIA A FLEXIÓN</b> 28 días (MPa)	<b>MÓDULO ELÁSTICO E</b> (GPa)
Serie H.T.1	6.27	1.49
Serie H.F.2.-600	5.62	1.34
Serie H.F.1.-900	8.03	1.91
Serie H.F.2.-900	6.63	1.21
Serie H.F.1.-1200	6.93	1.49
Serie H.S.F.1-600	5.01	1.57
Serie H.S.F.2-600	5.65	1.17
Serie H.S.F.1-900	5.22	0.78

*Tabla 3.42. Valores de resistencia máxima flexión y módulo elástico de probetas sometidas a flexión con carga en un punto y doblemente apoyadas en probetas pasados 24 meses.*

Los valores obtenidos para el módulo elástico son demasiado bajos para hormigones, indicándonos una ductilidad de éstos excesiva, por lo que no serán considerados como valores absolutos aunque sí para diferenciar y comparar entre las distintas series ensayadas. Estos valores pueden haberse distorsionado debido a la dificultad del propio ensayo y de la máquina empleada para ello que mide con poca exactitud la flecha. Añadido a esto la dimensión de las probetas dificulta la colocación del medidor de flechas en el eje de éstas y puede acompañar en el movimiento a la pieza ensayada.

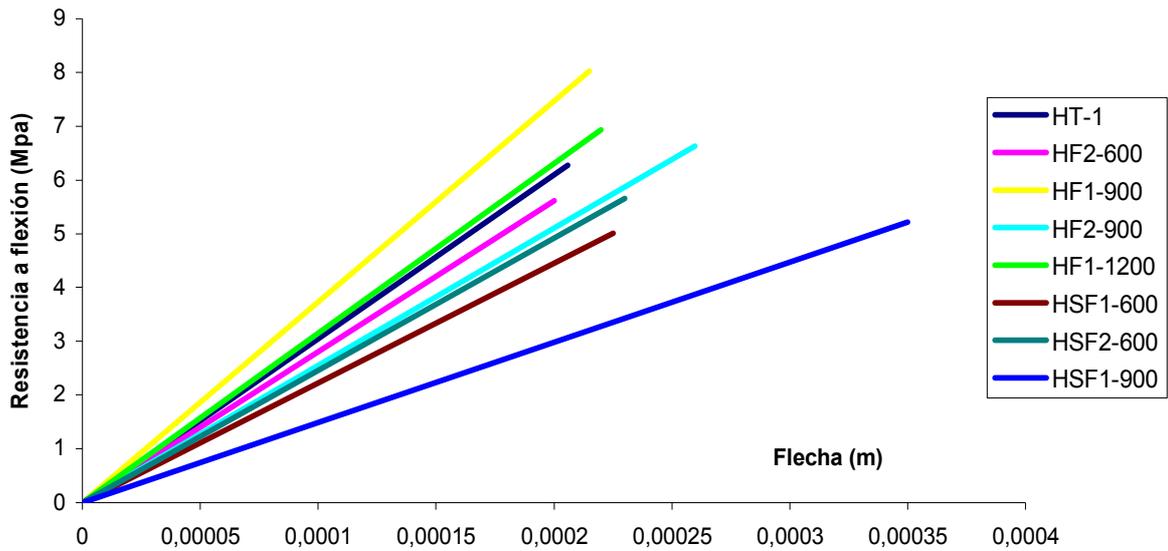


Figura 3.17. Gráfica de resistencia a flexión-flecha en probetas sometidas a flexión de las distintas series de hormigón avanzado pasados 24 meses.

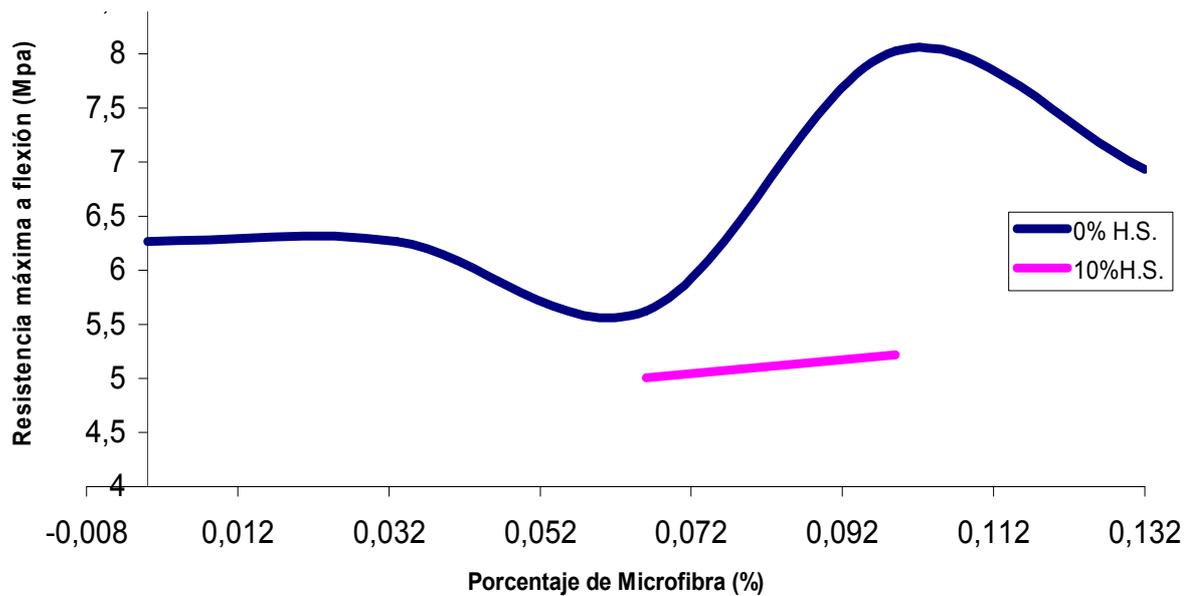


Figura 3.18. Gráfica de relación entre resistencia máxima a flexión y porcentaje de fibra en series con y sin humo de sílice.

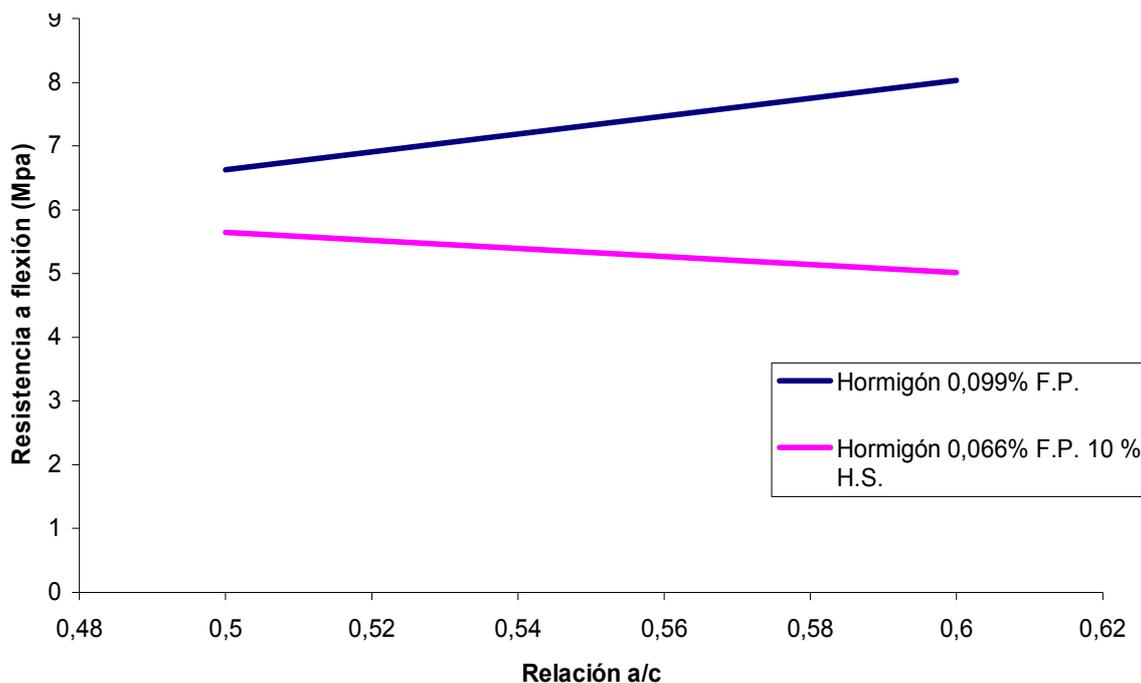


Figura 3.19. Gráfica de relación entre resistencia máxima a flexión y relación a/c en series de probetas prismáticas  $4 \times 5 \times 16 \text{ cm}^3$  obtenidas mediante corte de losas.

La adición de fibra corta de polipropileno en los hormigones canarios no produce como era de esperar espectaculares mejoras en este parámetro, al tratarse de una fibra sin función resistente posterior al curado del mismo. No obstante se mejoraron capacidades en las series con cantidades de microfibra cercanas al 0,1 %.

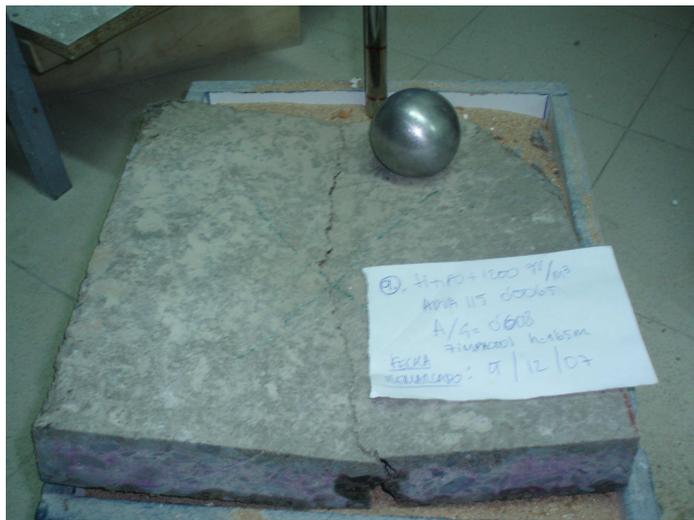
En cambio la adición de microsílíce perjudicó el trabajo a flexión de las series que lo contenían. Especialmente en las series con poca o nula cantidad de fibra, ya que debido a dimensión de las probetas las fisuras incluso de pequeño tamaño debilitaban el material para su ensayo.

### 3.2.1.5. Resistencia a impacto.

El ensayo de impacto ha sido desarrollado mediante plataforma de lanzamiento de altura 1,65 metros. La carga empleada era de 1 Kg., que impactaba sobre losas de 5 cm. de espesor apoyadas en lecho de arena. Estas probetas fueron obtenidas de fragmentos de losas Kraii empleadas en el control de fisuración que veremos posteriormente.



*Fig.3.20. Imagen de plataforma de ensayo para resistencia a impactos de losas de hormigón.*



*Fig. 3.21. Imagen de probeta fracturada después de ser ensayada a impacto y de esfera de peso 1 Kg.*

NUMERO DE SERIE	NÚMERO DE IMPACTOS FISURACIÓN	NÚMERO DE IMPACTOS ROTURA
Serie H.T.1	13	13
Serie H.T.2	4	4
Serie H.F.2.-600	35	43
Serie H.F.1.-900	13	13
Serie H.F.2.-900	31	34
Serie H.F.1.-1200	7	7
Serie H.S.1.	--	--
Serie H.S.F.1-600	10	15
Serie H.S.F.2-600	42	50
Serie H.S.F.3-600	8	8
Serie H.S.F.1-900	9	11

Tabla3.43. Resultados de rotura por impacto de un Kg. desde una altura de 1.65 m. Se han tomado valores de rotura superficial y de rotura total de las distintas probetas.

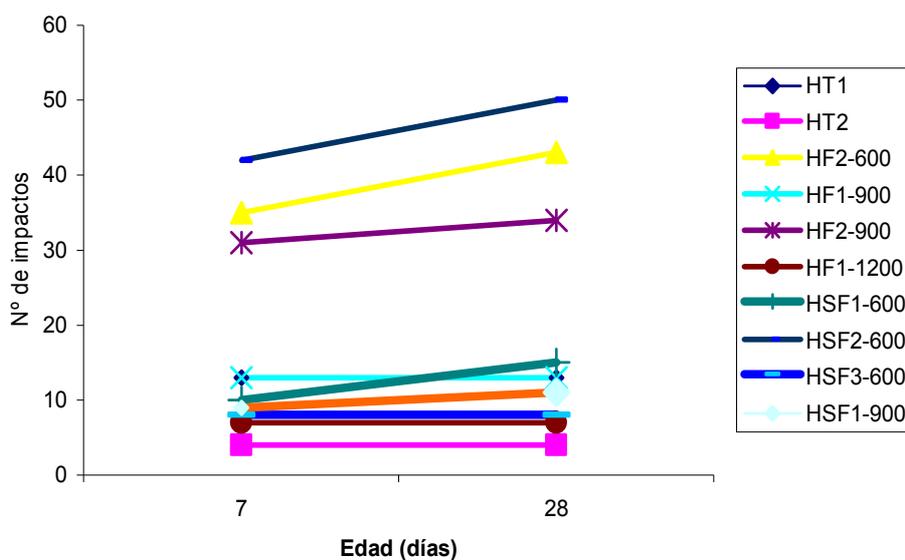
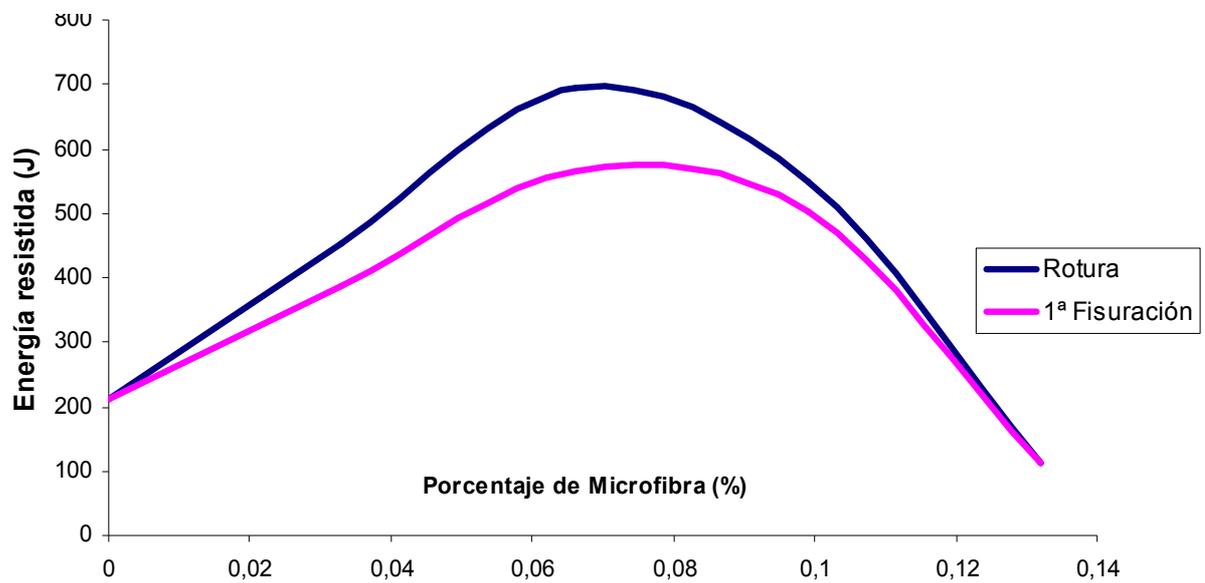


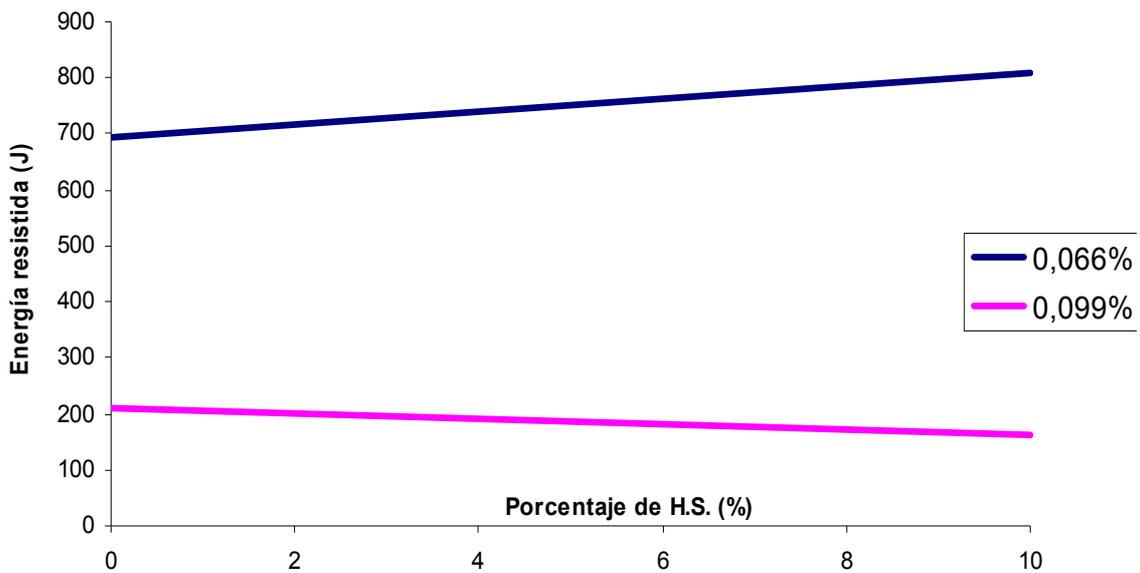
Fig.3.22. Gráfica de relación entre número de impactos en el momento de fisuración (1) y rotura total (2) de la losa de hormigón de las distintas series.



*Fig.3.23. Imagen de la superficie de la probeta de la serie H.S.2-600 ensayada a impacto. En la esta probeta se observó la capacidad de la superficie a deformarse con el impacto antes de fisurar y posteriormente romper.*



*Figura 3.24. Gráfica de relación entre energía resistida para la rotura y para la fisuración inicial y la cantidad de fibras por volumen de hormigón.*



*Fig.3.25. Gráfica de relación entre energía resistida a impactos para la rotura según el porcentaje Humo de Sílice añadido a la dosificación.*

En general se aprecia una mejora de las capacidades a impacto con la adición de fibras, en especial en los porcentajes de 0,066% de fracción volumétrica correspondientes a cantidades de  $600 \text{ gr/m}^3$  de hormigón. En la gráfica anexa se observa que la mejora se produce tanto en la formación de la primera fisura como en la rotura final de la pieza. En contradicción podemos ver que en porcentajes superiores al 0,12 % de fibra el efecto de ésta es negativo.

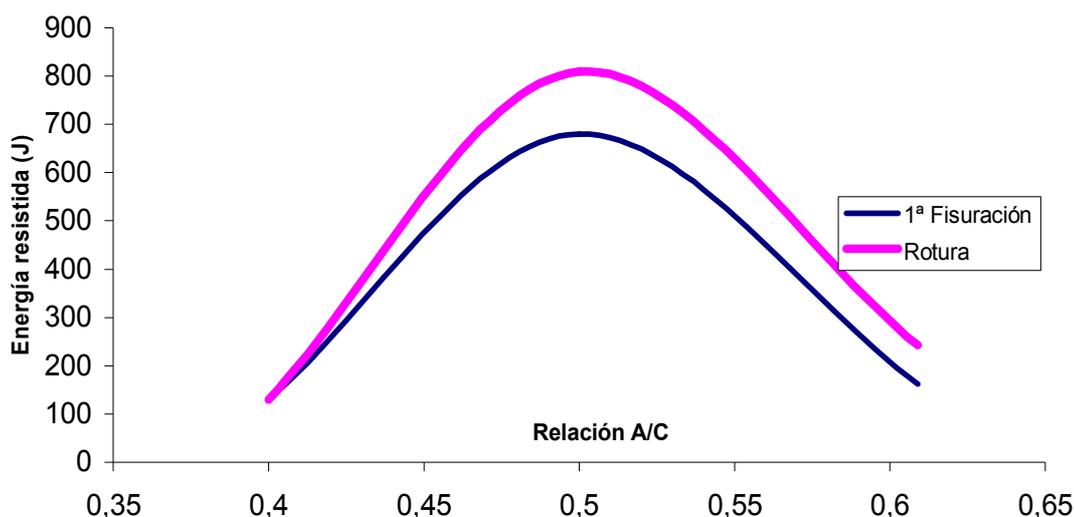
Este comportamiento se produce tanto en los hormigones con Humo de Sílice como en los que sólo poseen fibras. Podemos apreciar como en correspondencia con lo apuntado por M.C. Nataraja (24) en su estudio del efecto de las fibras de acero en hormigones reforzados que con las fibras de polipropileno se consigue también un material más dúctil, capaz de resistir después de la primera fisura hasta un segundo estado de rotura.

Balaguru-Shah (17) estudiaron la resistencia a impacto de probetas con adiciones de fibras poliméricas, entre ellas de polipropileno, según el tipo de fibra, la fracción

volumétrica y la composición de la matriz. Se mejora muy poco la aparición de la primera fisura, consiguiéndose buenos resultados de aumento en la resistencia de rotura hasta un 250 %.

La incorporación de humo de sílice es dispar en las distintas series. En el caso de hormigones con sólo adición de humo de sílice no ha sido posible estudiar la cantidad de golpes en losas, pues como veremos en el estudio posterior de control de la fisuración, el ancho y profundidad de las mismas en estas losas, las debilitó demasiado para la resistencia de impactos.

En cuanto a la mejora de resistencias a impacto de las distintas relaciones de a/c se mejoró con la reducción de 0,6 a 0,55, pero se bajaron los valores al disminuir más aún hasta 0,40, como se demuestra con la siguiente gráfica.



*Fig.3.26. Gráfica de relación entre energía resistida a impactos y la relación a/c en probetas con igual cantidad de fibras y humo de sílice.*

En aquellas con fibras y humo de sílice se consiguieron mejoras con un porcentaje del 0,066% de fibras y se mantuvieron estables los valores en los de 0,1%. Podemos establecer un valor óptimo en la serie H.S.F.2-600.

### **3.2.1.5. Conclusiones.**

Una de las primeras conclusiones a las que podemos llegar es que el humo de sílice por sí solo debilita la pieza debido a la excesiva fisuración que provoca en ésta, por lo que se debe controlar para su empleo posterior a impacto al igual que a flexión como vimos anteriormente, quizá la razón sea que se hace más frágil con la adición de microsílíce.

La fibra aporta por tanto resistencia a impacto, con un valor óptimo en torno al 0,066-0,099%.

El control de la relación a/c es importante. Se debe de tener en cuenta que valores excesivos o muy bajos producen malos resultados. En la serie de probetas ensayadas el valor óptimo se encuentra en valores cercanos a 0,50.

La combinación de Humo de sílice con fibra corta de polipropileno consigue buenos resultados, al haber conseguido con la fibra que no exista excesiva fisuración debilite la pieza.

## **3.2.2. LA FISURACIÓN EN LOS HORMIGONES AVANZADOS CANARIOS.**

### **3.2.2.1. Ensayos desarrollados.**

El estudio de la fisuración como se comentó en el bloque del estado del arte es de gran importancia en la durabilidad del hormigón. El proceso se produce de manera más significativa en los primeros momentos de vida del hormigón, durante el endurecimiento del mismo al poseer aún poca resistencia mecánica.

El ensayo seguido es el de realización de losas Kraai, test de fisuración de probeta doblemente restringida de las deformaciones. Se trata de losas de medidas 100x50x5 cm<sup>3</sup> a las que se les dispone previo a su hormigonado unos anclajes metálicos en forma de U en el encofrado para coaccionar el desplazamiento de la masa de hormigón fresco en su cambio volumétrico, favoreciendo de esta manera la fisuración.

Las condiciones en las que el hormigón fragüe y cure serán más desfavorables si este está coaccionado en su desplazamiento, no se cura adecuadamente y si existen condiciones que favorezcan la evaporación de agua, como altas temperaturas, viento,...etc.



*Fig.3.27. Imagen del molde para la realización de la losa Kraii. Se pueden apreciar las piezas de anclaje en U.*

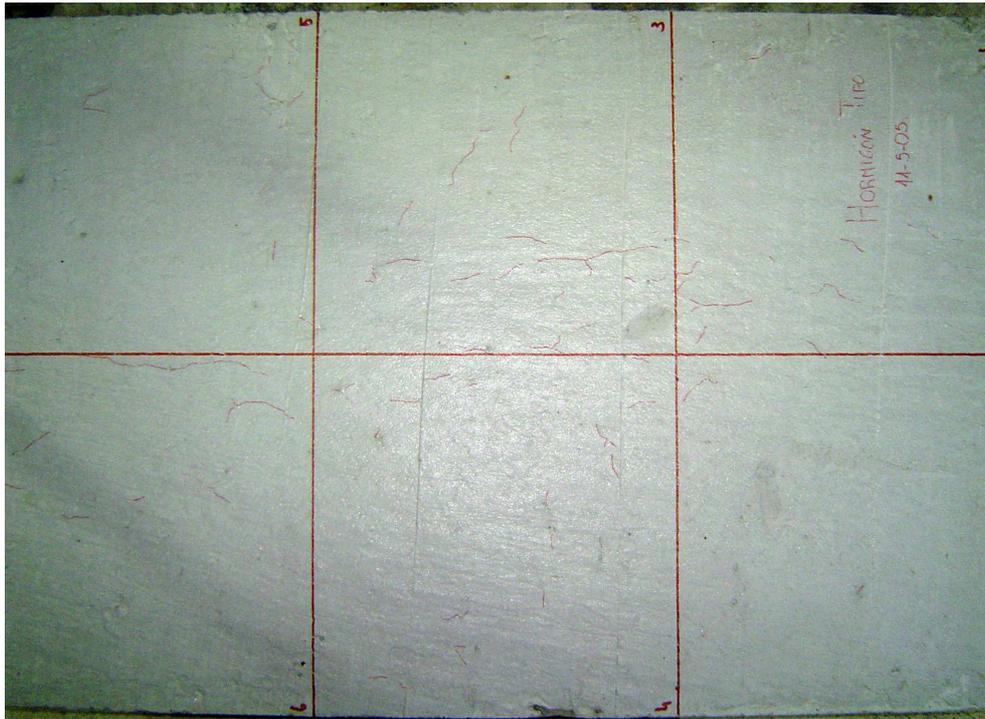
Se han realizado probetas con condiciones de viento, colocando un ventilador a una distancia de 15 cm de la losa a una velocidad constante de 3 m/s durante las primeras 6 horas de fraguado, forzando de esta manera la evaporación de agua y su migración a la superficie. Este periodo se corresponde con el momento de máxima retracción, como veremos en el apartado posterior dedicado a este tema.



*Fig.3.28. Vista de losa Kraii y de bandeja de retracción, con ventilador durante ensayo efectuado en losa con dosificación de  $0,900 \text{ kg/m}^3$  y 10 % microsíllice sobre peso de cemento, relación a/c 0,55 (H.S.F.2-900).*

Una vez realizado el ensayo a las 24 horas se procede a un primer marcado de las fisuras y pasados 28 días a un marcado final y contabilidad de anchos y longitudes. En general las primeras fisuras que se marcan son las que posteriormente se mantienen, aunque éstas aumentan sus anchos. Una vez pasados 24 meses se ha procedido a un remarcado de las probetas, una vez estas han estado expuestas al exterior y se han vuelto a contabilizar los anchos y las longitudes de las mismas.

Para facilitar el marcado y contabilidad de fisuras se dividen las losas en seis áreas iguales, estableciendo los valores de manera más estructurada.



*Fig.3.29. Losa Kraai hormigón tipo. Vista general de la losa dividida por sectores y marcado de las fisuras.*



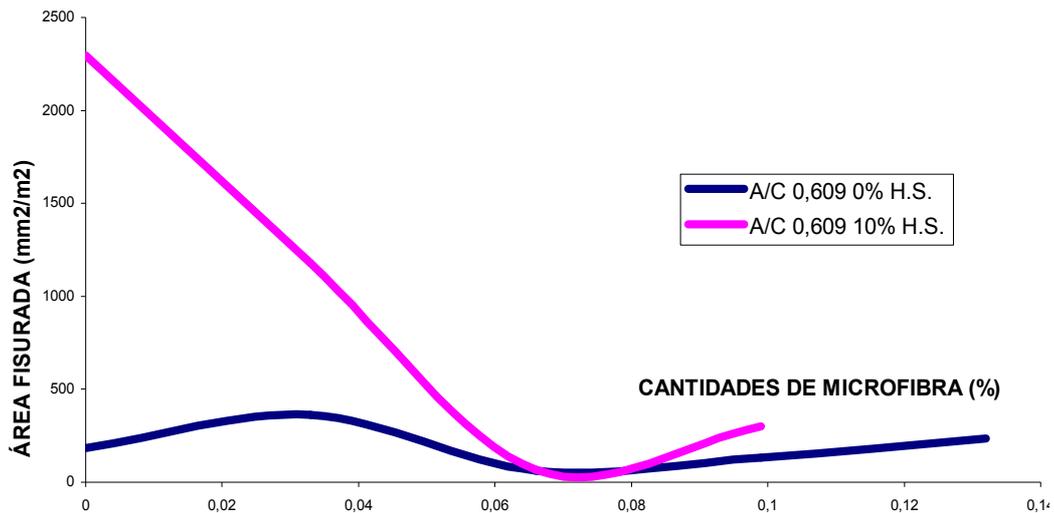
*Fig.3.30. Imagen de losa Kraai hormigón tipo. Vista general de la losa dividida por sectores y re-marcado de las fisuras pasados 24 meses.*

Se calculan tres parámetros. Por un lado, la fisura máxima (dimensión de la mayor fisura), la longitud de fisura (longitud total resultado de la sumatoria de las longitudes parciales de todas las fisuras contabilizadas) y el área fisurada (sumatoria de las áreas de todas las fisuras).

### 3.2.2.2. Área fisurada.

NUMERO DE SERIE	ÁREA FISURADA (mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE FISURAS
Serie H.T.1	183,80	76
Serie H.T.2	135,25	15
Serie H.F.1.-300	363,44	54
Serie H.F.1.-600	62,50	55
Serie H.F.1.-900	131,60	45
Serie H.F.2.-900	70,50	32
Serie H.F.1.-1200	236	108
Serie H.S.1.	2295,40	39
Serie H.S.F.1-600	65	1
Serie H.S.F.2-600	0	0
Serie H.S.F.3-600	0	0
Serie H.S.F.1-900	300,20	17

*Tabla 3.44. Tabla resumen de resultados de medición de área total fisurada y cantidad de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras.*



*Fig.3.31. Gráfica de relación entre el área fisurada con la cantidad de fibra añadida al hormigón con y sin humo de sílice o microsílíce.*

Al observar el efecto de la microfibras en el control de la fisuración de los hormigones podemos observar como su efecto es positivo, especialmente en cantidades cercanas a 0,066% del volumen del hormigón. Este efecto es más visible en los hormigones a los que se les ha adicionado humo de sílice, debido a que el área fisurada en el hormigón tipo con adición por sustitución de un 10% de cemento por microsílíce es muy importante.

El control de los hormigones con fibras sobre la fisuración llega a valores de reducción del área fisurada del 300% en los hormigones convencionales y en los de adiciones de microsílíce a reducciones del área fisurada del 3500%.

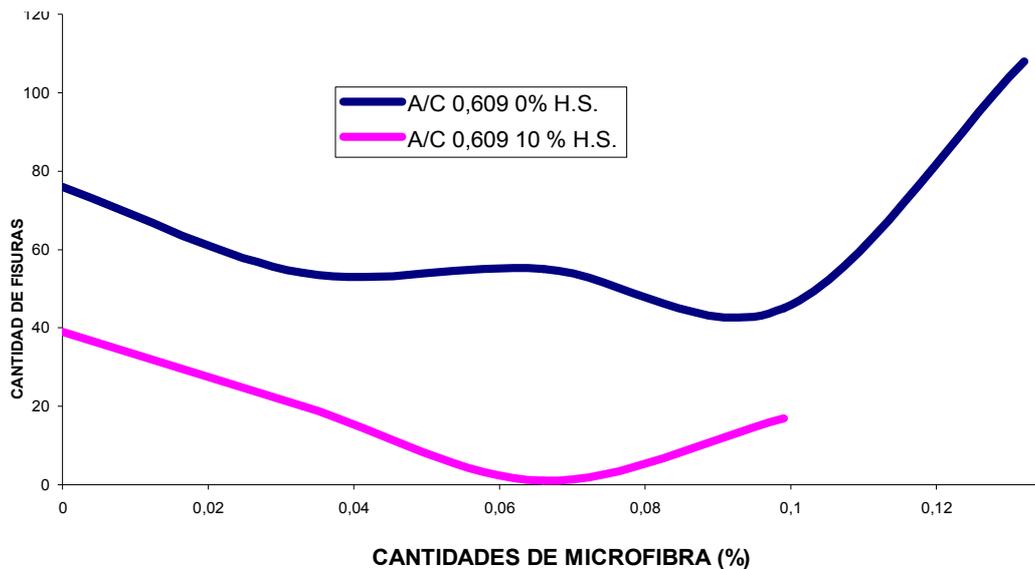


Fig.3.32. Gráfica de relación entre la cantidad de fisuras con la cantidad de fibra añadida al hormigón con y sin humo de sílice o microsílíce.

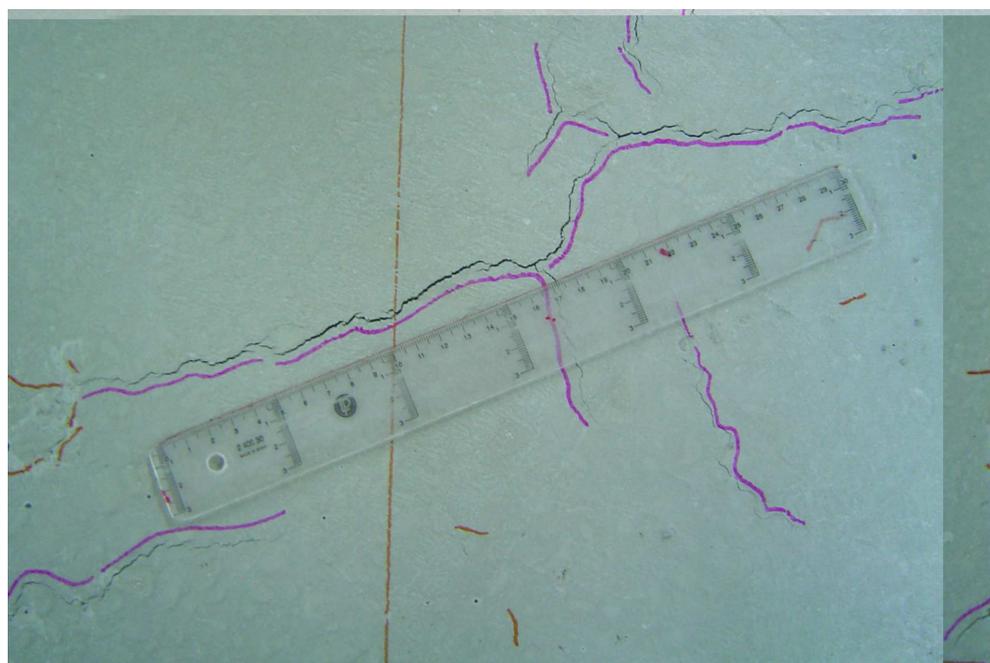
En lo que se refiere a la cantidad de fisuras contabilizadas podemos observar una reducción de la cantidad de fisuras con el empleo de fibras, especialmente en la relación de  $600 \text{ gr/m}^3$  en los hormigones con adición de microsílíce y de  $900 \text{ gr/m}^3$  en las que no poseen adición de humo de sílice.

La reducción en lo que ha porcentaje se refiere no es tan espectacular como en el control del área fisurada, debido a que la fibra reduce el ancho de fisura principalmente, produciendo incluso su no aparición. La cantidad de fisuras no indica tanta preocupación en el control del material como el del área fisurada, que representa el espacio de exposición de la probeta al medio externo.

A continuación se presentan una serie de imágenes de losas que atestiguan estos resultados. En el caso de la fisuración producida en el hormigón tipo con 10% de adición de humo de sílice el ancho provocó la rotura posterior de la probeta, siendo inservible para ensayos posteriores, con fisuras de gran ancho y por lo tanto gran profundidad. Los valores de estos anchos llegaron a valores de 1,5 mm. El humo de sílice hace que el hormigón sea más resistente pero más frágil.



*Fig.3.33. Imagen general de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón tipo con adición de microsílíce en un 10% de sustitución de cemento (H.S.1).*



*Fig.3.34. Imagen parcial de uno de los sectores de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón tipo con adición de microsílíce en un 10% de sustitución de cemento (H.S.1).*



Fig.3.35. Imagen general de losa Kraai para estudio de fisuración en hormigón con adición de microsilice y fibra corta de polipropileno, relación A/C=0,40 (H.S.F.3-600), en la que no se aprecian fisuras.

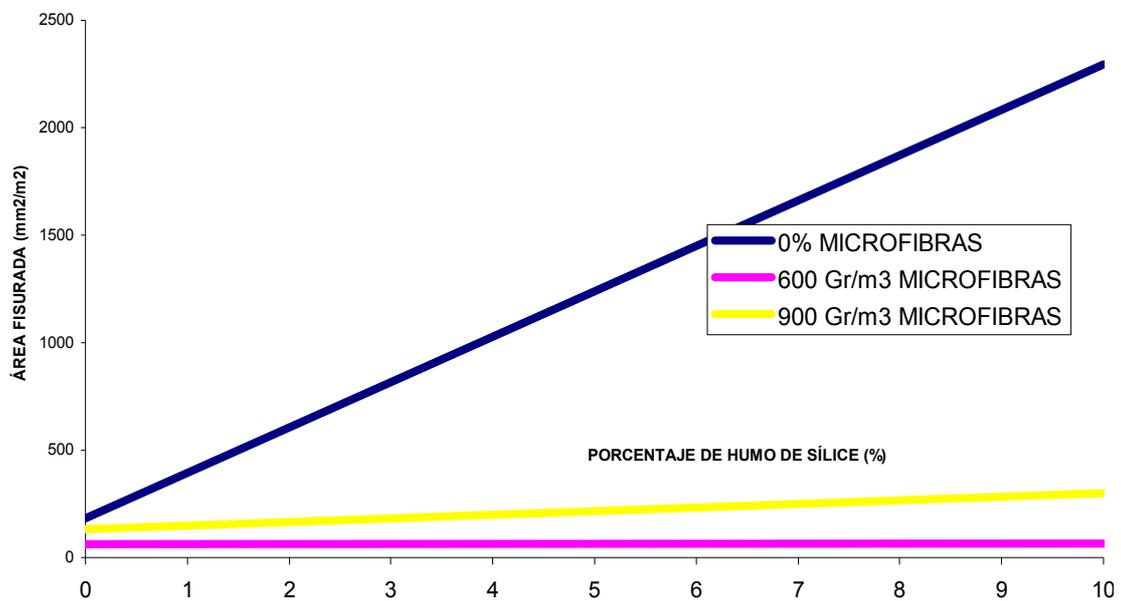
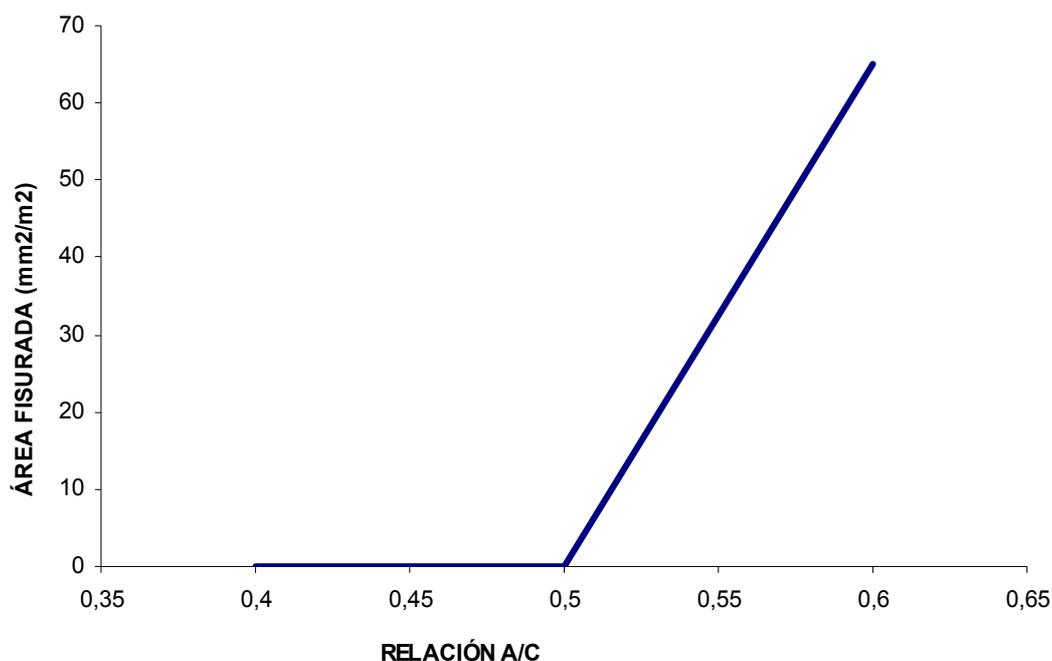


Fig.3.36. Gráfica de relación entre el área fisurada con la cantidad de humo de sílice adicionado con series de distintas proporciones de microfibra añadidas al hormigón.

La adición de microsílíce en el hormigón aumenta los efectos de la fisuración un 1250% si no se controla con microfibra. Se puede observar que el aumento en estos casos no llega ni al diez por ciento o se mantienen constantes.

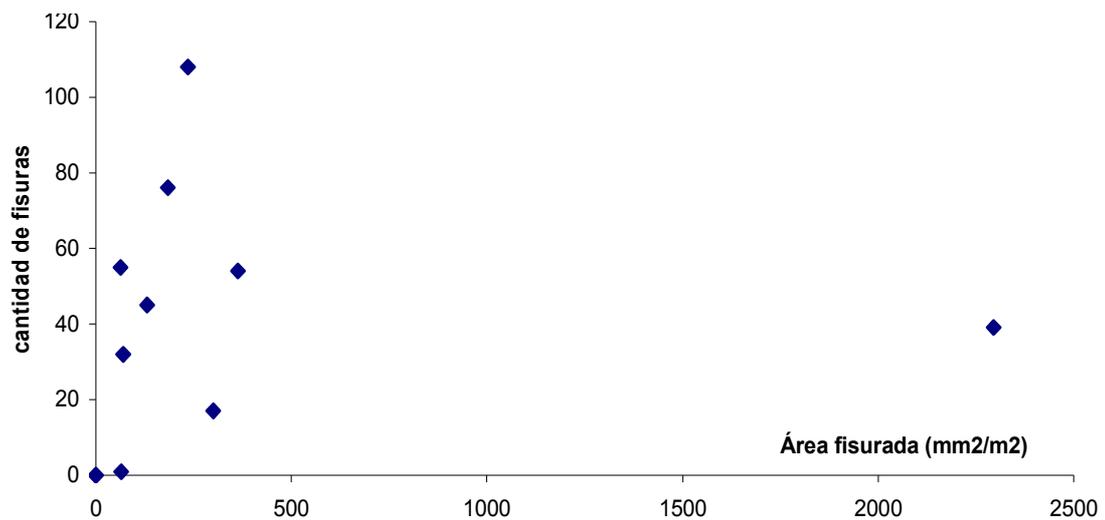
Podemos observar como el área fisurada se mantiene invariable en los ambos casos de hormigones con  $600 \text{ gr/m}^3$ , exactamente en  $65 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ .



*Fig. 3.37. Gràfica de relació entre el àrea fisurada con la relació Agua/Cemento con cantidades constantes de microfibras de un 0,066%.*

Otro parámetro estudiado es el del efecto de la reducción de la cantidad de agua de fraguado en los hormigones. El estudio presentado en la tabla anterior se ha realizado manteniendo constantes la cantidad de fibra y de microsílíce. Con la reducción de la relación A/C en un 20% se han conseguido que no exista fisuración en los hormigones sin adiciones.

En caso de hormigones canarios sin adiciones la reducción de agua de fraguado también efectúa un buen papel en el control de la fisuración, hasta en un 35 % el área fisurada.



*Fig.3.38. Gráfica de relación entre el área fisurada y la cantidad de fisuras en hormigones con y sin fibras.*

Como podemos ver la relación entre cantidad de fisuras y el área fisurada no es directa o proporcional. Normalmente en valores altos de cantidad de fisura se consiguen menores valores de área fisurada.

Teniendo en cuenta esto es preferible poseer un hormigón con una superficie con forma de “tela de araña” que un hormigón con una fisura única de mayor ancho y profundidad, que como hemos visto en la serie HS-1 incluso ha debilitado la probeta.

Una vez pasados dos años las mismas probetas fueron remarcadas, observando generalmente una desaparición de fisuras de pequeño ancho, reduciéndose la cantidad de fisuras de las probetas, aunque en menor medida el área fisurada, al ser estas las de menos influencia en este parámetro.



*Fig.3.39. Imagen de probeta de hormigón con adición de microfibras de polipropileno en porcentaje 0,033% después de realizarle el remarcado.*

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>ÁREA FISURADA (mm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)</b>	<b>NÚMERO DE FISURAS</b>
Serie H.T.1	165,02	70
Serie H.T.2	105,05	14
Serie H.F.1.-300	323,20	45
Serie H.F.1.-600	52,50	35
Serie H.F.1.-900	130,60	42
Serie H.F.2.-900	65,50	30
Serie H.F.1.-1200	196,00	95
Serie H.S.1.	2295,40	39
Serie H.S.F.1-600	65,00	1
Serie H.S.F.2-600	0	0
Serie H.S.F.3-600	0	0
Serie H.S.F.1-900	275,15	15

*Tabla 3.45. Tabla resumen de resultados de medición pasados dos años de área total fisurada y cantidad de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras.*

Prácticamente todas las probetas variaron sus valores menos la de 10% de adición de humo de Sílice, que mantuvo su valor.

### 3.2.2.3. Longitud máxima de fisura.

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>LONGITUD MÁXIMA DE FISURA (mm)</b>	<b>LONGITUD TOTAL FISURADA (mm/m)</b>
Serie H.T.1	105	367,60
Serie H.T.2	35	245,30
Serie H.F.1.-300	150	388,20
Serie H.F.1.-600	40	125
Serie H.F.1.-900	50	139
Serie H.F.2.-900	35	141
Serie H.F.1.-1200	50	472
Serie H.S.1.	215	1788
Serie H.S.F.1-600	65	65
Serie H.S.F.2-600	0	0
Serie H.S.F.3-600	0	0
Serie H.S.F.1-900	90	143

*Tabla 3.46. Tabla resumen de resultados de medición de longitud máxima de fisura y longitud total de fisuras en losas de hormigones con y sin humo de sílice, con adiciones de fibras.*

Al igual que en los parámetros estudiados anteriormente la fibra mejora también la longitud de la fisura máxima y de la longitud total fisurada. En concreto el valor óptimo se sigue manteniendo en la cantidad de 600 gr/m<sup>3</sup>.

La reducción del valor de longitud máxima se eleva a un 262% en el caso de incluir en la masa microfibras en proporción 0,066% en hormigones sin microsílíce y en un 330% en hormigones con microsílíce en sustitución de un 10% del cemento.

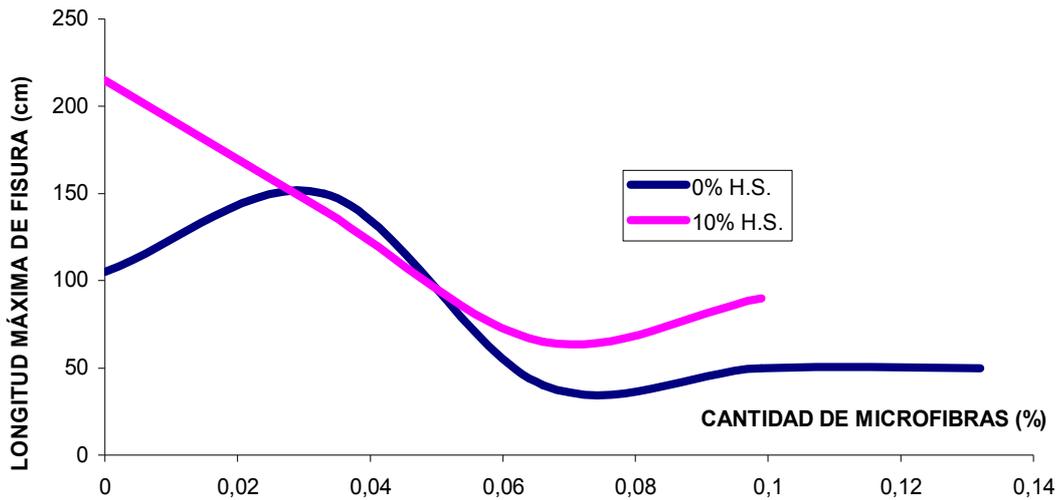


Fig. 3.40. Gráfica de relación entre la longitud máxima de fisura y la cantidad de microfibras manteniendo constante la relación a/c en 0,609 con y sin adición de humo de sílice.

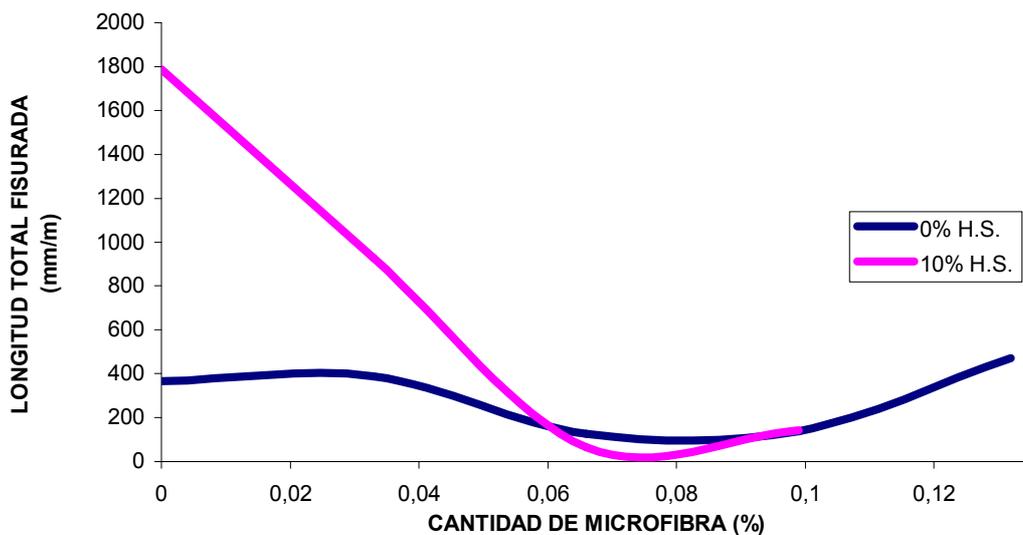
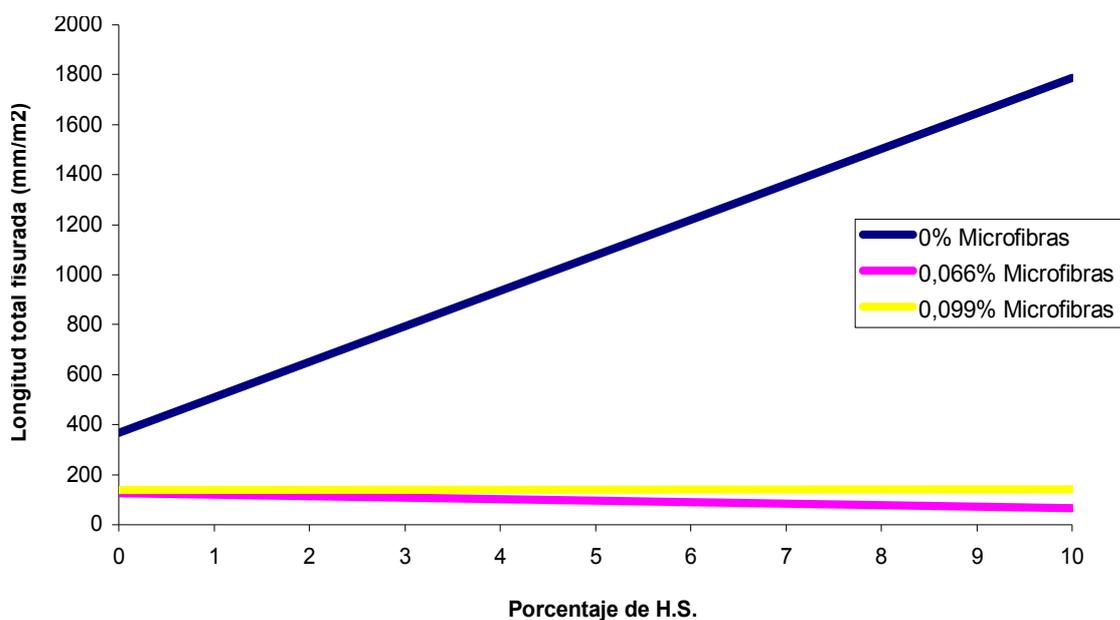


Fig. 3.41. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y la cantidad de microfibras manteniendo constante la relación a/c en 0,609 tanto con como sin microsílíce.

La reducción del valor de longitud total fisurada se eleva a un 294% en el caso de incluir en la masa microfibras en proporción 0,066% en hormigones sin microsílíce y en un 2750 % en hormigones con microsílíce en sustitución de un 10% del cemento. Es en este aspecto donde la adición de microfibras es más destacado.



*Fig.3.42. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y la cantidad de humo de sílice manteniendo constante la relación a/c en 0,609 en las distintas series con adiciones de microfibras de polipropileno.*

El microsílíce afecta negativamente tanto a la longitud total fisurada como a la longitud máxima registrada de fisura. Este aspecto es especialmente dañino si no se efectúan controles de la fisuración así como la adición de microfibras o la reducción de agua.

La mejora en el empleo de microfibras es notable en este campo, llegando a anular el efecto en relaciones también del 0,066%.

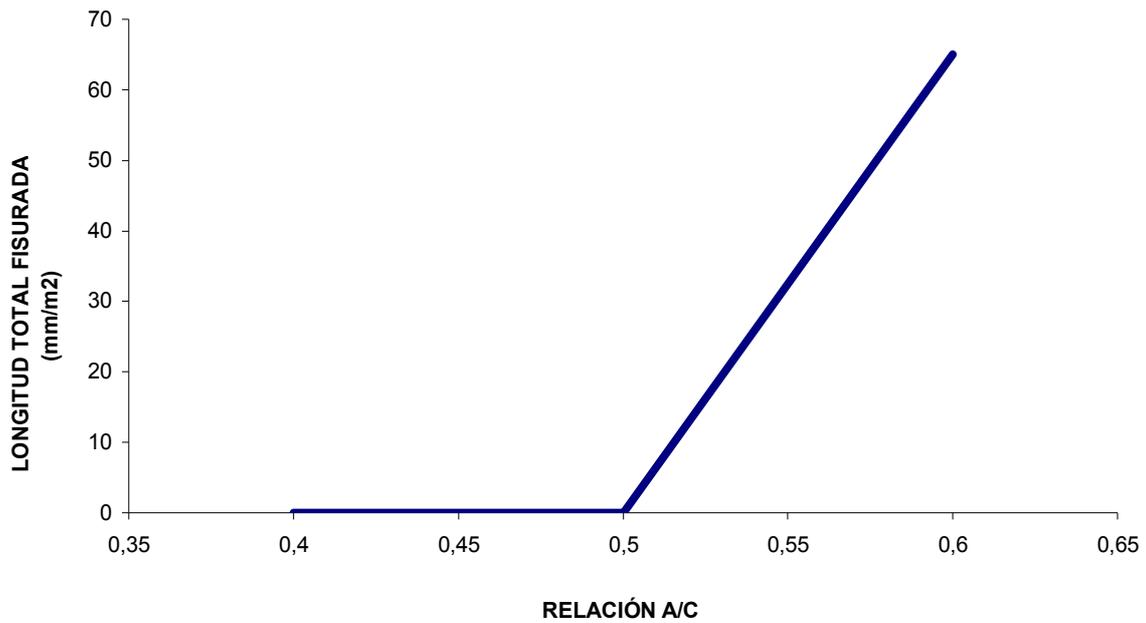


Fig. 3.43. Gráfica de relación entre la longitud total fisurada y relación a/c en hormigones con microsílíce y 0,066% de adición de fibra corta de polipropileno.

La reducción de la relación Agua/Cemento ha conseguido reducir los parámetros, llegando a valores nulos en torno a una relación 0,50, manteniéndose en valores nulos también en relaciones menores.

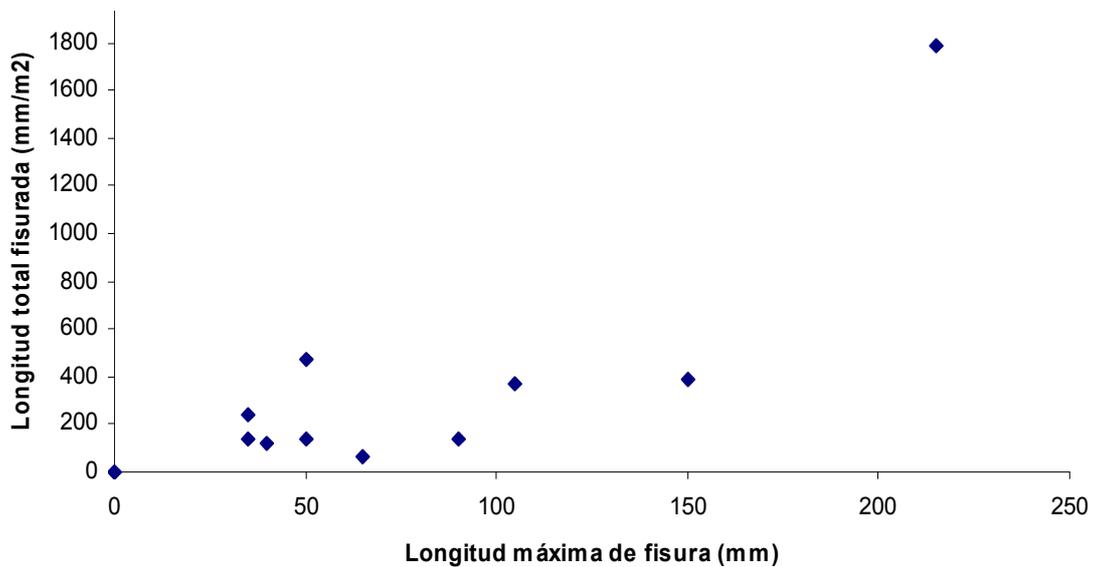


Fig. 3.44. Gráfica de relación entre la longitud máxima de fisura y la longitud total fisurada.

En este caso como era lógico se produce un aumento de la longitud total fisurada con el aumento de la longitud máxima de fisura. El hormigón con humo de sílice se presenta también este aspecto como el más propenso a fisurar.

#### **3.2.2.4. Conclusiones.**

Con los ensayos realizados podemos apreciar serias mejorías en hormigones con fibras, estableciendo como porcentaje óptimo el de 0,066%. La respuesta de las fibras es más visible en aquellos casos en los que las condiciones externas ajenas al hormigón son más comprometidas, con viento y poca humedad. En nuestro caso en las series con adición de humo de sílice por sustitución del cemento las mejoras han sido muy importantes.

En lo que se refiere a la relación a/c, en porcentajes menores a 0,5 en hormigones sin fibras y menores o iguales a 0,5 en hormigones con fibras, se consiguen mejoras tanto en el área fisurada como en la longitud total fisurada.

De los parámetros estudiados el del área total fisurada es el que más nos interesa, al poner de relieve la cantidad de hormigón que se verá expuesto a las condiciones ambientales.

En definitiva es preferible un hormigón con mayor cantidad de fisuras de pequeño ancho, al corresponder con menores cantidades de área fisurada y de longitud total fisurada, al poseer mayor cantidad de fisuras de menor ancho y tamaño, que tendrán menor exposición al exterior.

#### **3.2.3. La retracción en los hormigones avanzados canarios.**

##### **3.2.3.1. Ensayos desarrollados.**

El sistema de ensayos empleado establece valores de retracción en su conjunto, no se han aislado elementos para estudiar por separado los distintos tipos de retracción que mencionamos anteriormente en el estado del arte (2.4.1.4).

El ensayo a retracción se ha desarrollado depositando la masa de hormigón fresca en un molde prismático de medida interior de 500x100x50 mm<sup>3</sup>. En el lado más largo se sitúa un medidor electrónico de retracción con escalas de sensibilidad que llegan hasta la milésima de milímetro. La toma de datos es continua con fracciones de media hora entre las mismas mediante un registrador digital conectado al medidor.

La probeta es coaccionada en un lateral de la base metálica mediante fijaciones y por el otro se le permite el libre movimiento, donde se sitúa el medidor electrónico.

Podemos observar que para la medida de las mismas a fin de no influir en la retracción del mismo, colocamos un plástico en una superficie tratada con desencofrante para que se deslice la muestra libremente.

La duración de este ensayo no es igual en todas las series, pues el empleo de adiciones como los superplastificantes en sus distintas proporciones, aumentan el tiempo de fraguado. Normalmente es en las primeras seis horas cuando se registra la mayor parte del proceso de retracción, se mantuvieron hasta las veinte horas en algún caso.



*Fig.3.45. Esquema de la base para el ensayo de retracción en los hormigones avanzados canarios.*



*Fig. 3.46. Vista de instrumental de ensayo de medida de retracción. Se puede observar la bandeja de soporte, el medidor y el receptor de datos.*



*Fig. 3.47. Vista de instrumental de ensayo de medida de retracción. Imagen cercana del medidor.*

Las distintas series de probetas se han efectuado buscando perfiles de comportamiento en los hormigones. Se han variado parámetros como la relación

Agua/Cemento, se ha incluido fibra corta de polipropileno en distintas proporciones y se ha añadido microsílíce o humo de sílice.

También se ha variado el parámetro de la velocidad del viento en las distintas series, mediante la colocación de un ventilador calibrado con velocidad constante de 3 m/s en las primeras seis hora, para estudiar la influencia del mismo en la retracción de los hormigones.

### 3.2.3.2. Variación en la relación a/c en hormigones sin adiciones.

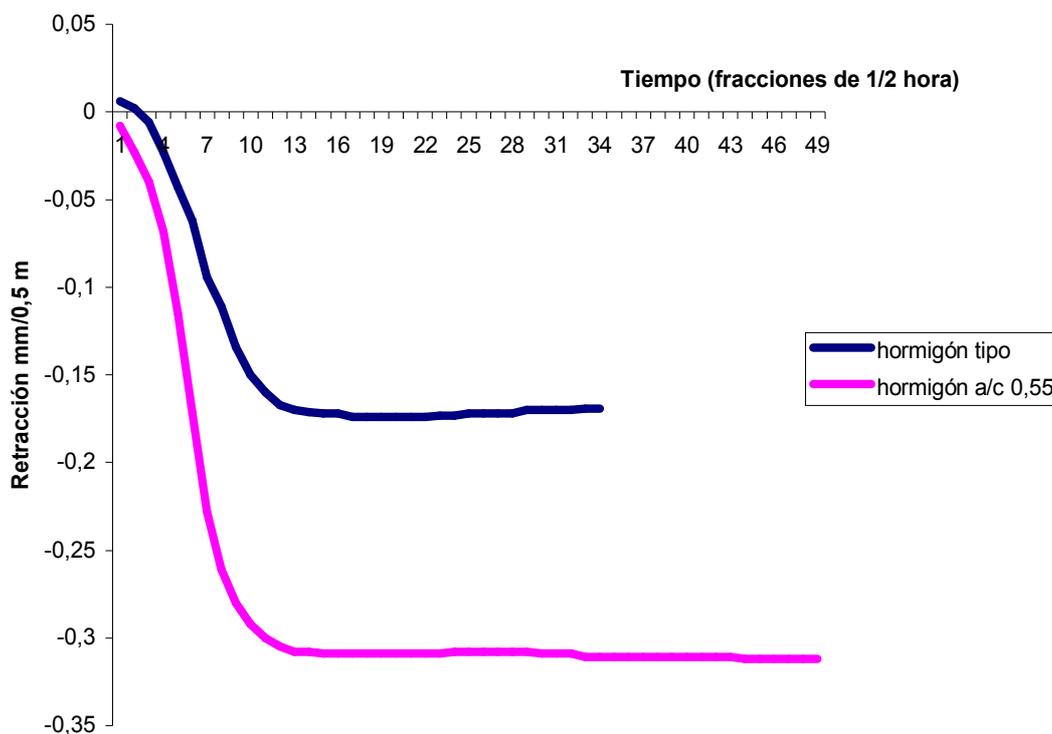


Fig. 3.48. Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la relación Agua/Cemento en las series en el tiempo.

Como se puede apreciar los valores de retracción aumentan progresivamente con el tiempo, alcanzando valores prácticamente constantes a partir de las seis primeras horas.

La reducción de agua en el hormigón sin adiciones produce un aumento de la retracción hasta en un 100%, manteniendo constantes los tiempos en los que se produce este factor.

### 3.2.3.3. Adición de microfibras de polipropileno.

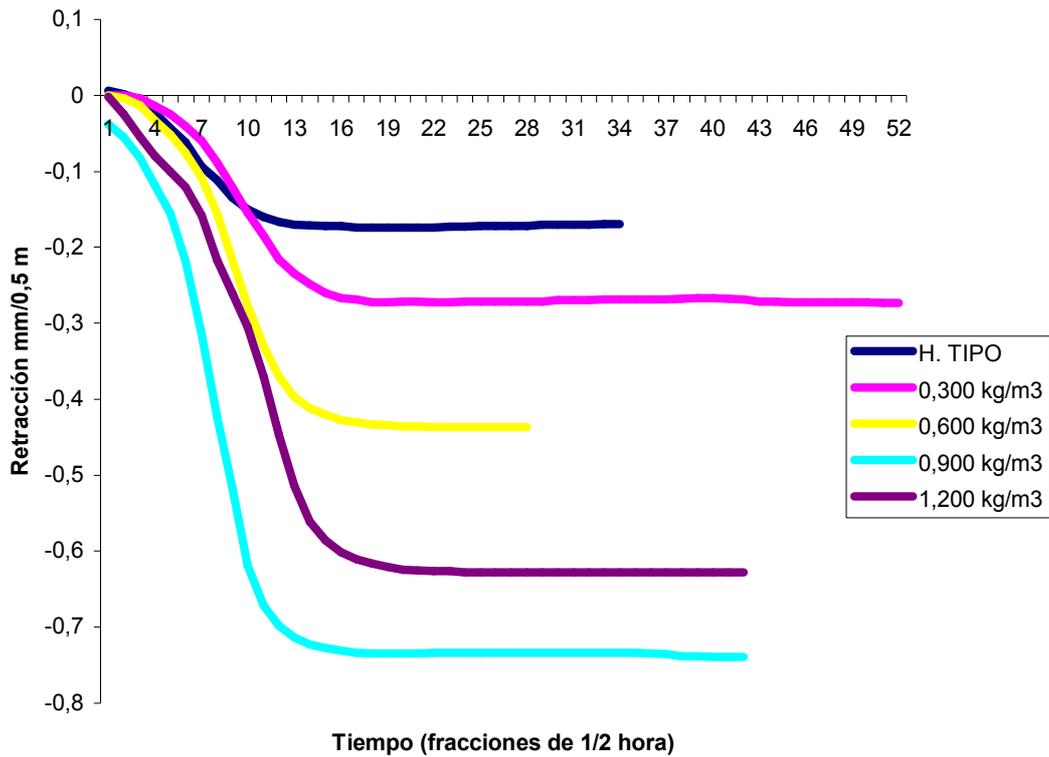
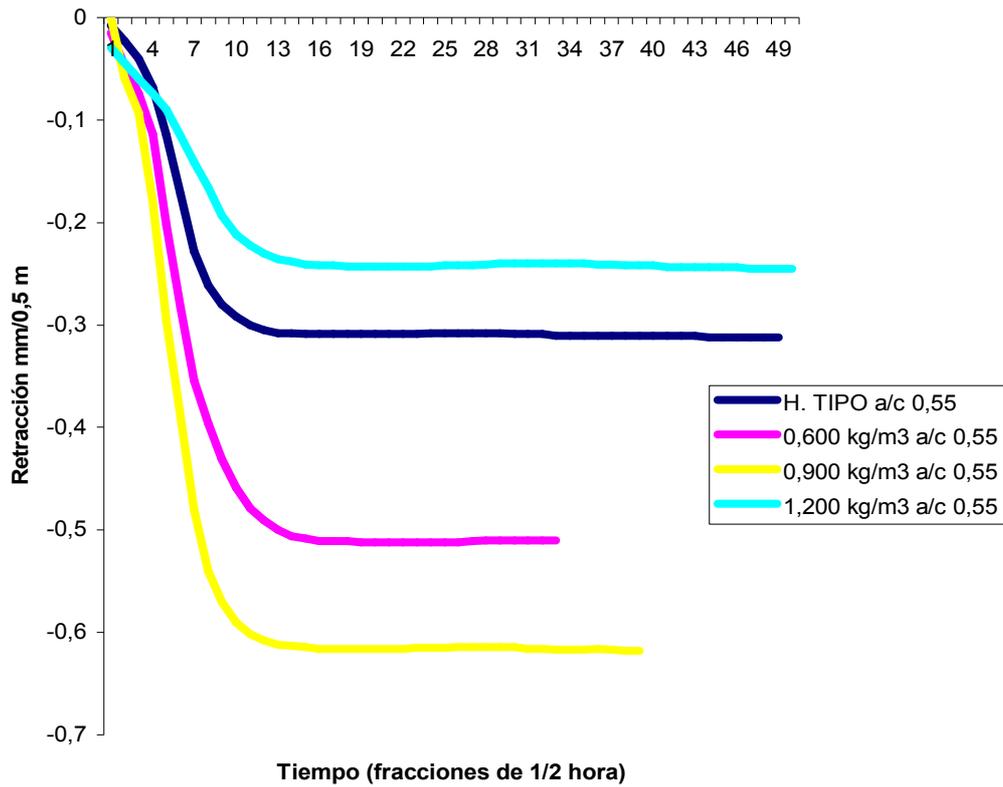


Fig.3.49. Gráfica de relación entre la retracción y tiempo en las distintas series con variaciones de la cantidad de fibra adicionada al hormigón.

La adición de microfibras en el hormigón produce un aumento de la retracción, aunque podemos observar que el parámetro del tiempo en el que establecen los valores máximos de retracción se mantiene constante.



*Fig.3.50 Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la cantidad de fibra adicionada al hormigón en el factor tiempo en relaciones a/c fijas de 0,55.*

En hormigones con relaciones de a/c menores podemos apreciar que ya no existe tanta diferencia al añadir microfibras, incluso en la serie con 0,132 % en peso de fibra se ha reducido la retracción.

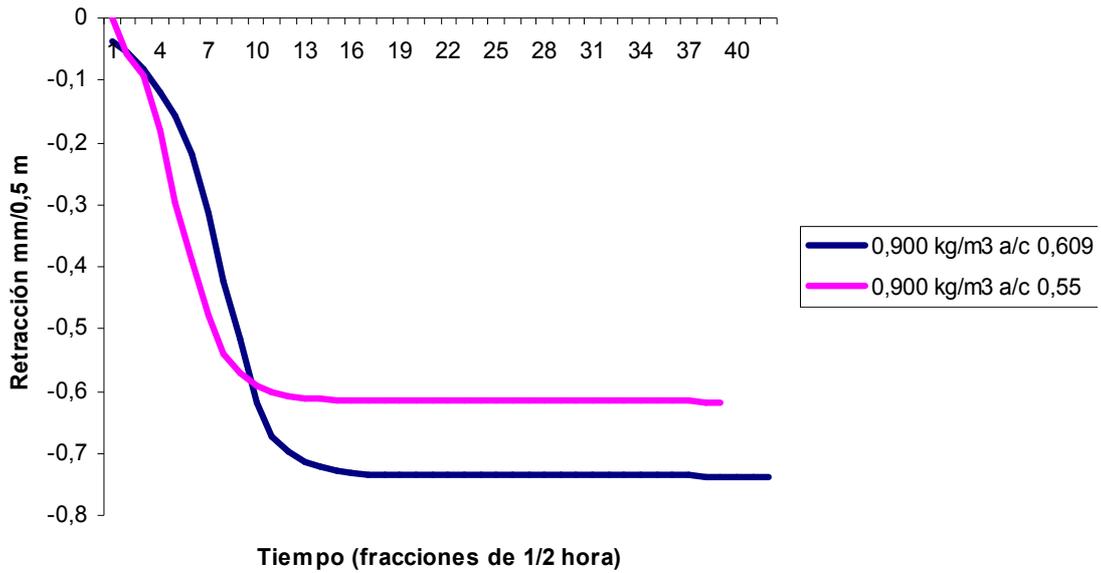


Fig.3.51. Gráfica de relación entre la retracción y la variación de la relación a/c en hormigones avanzados con fibras cortas de polipropileno constantes en el tiempo.

### 3.2.3.4. Adición de humo de sílice o microsílíce.

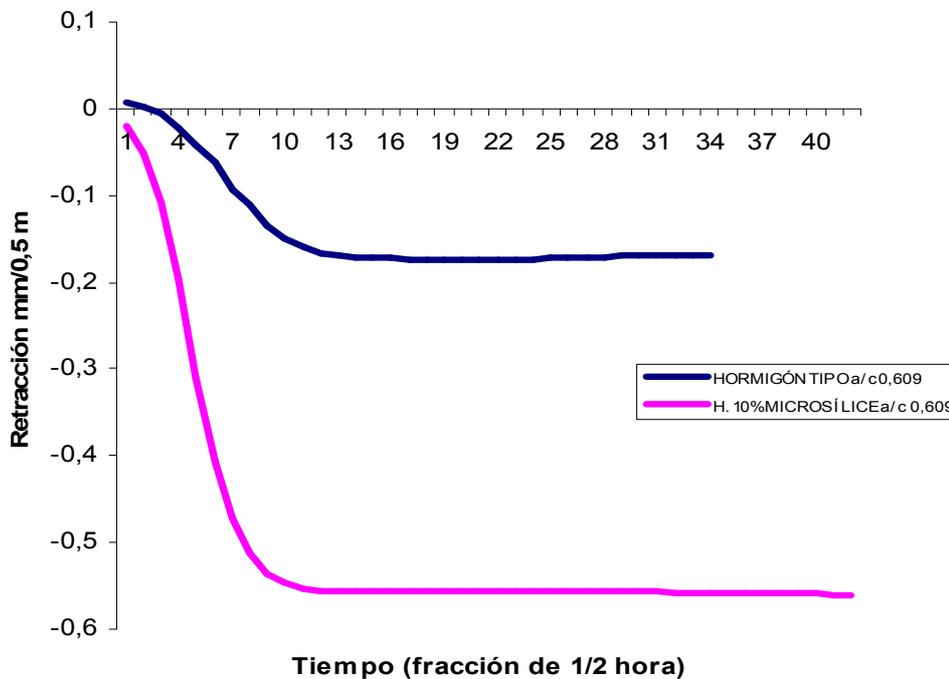


Fig.3.52. Gráfica de relación entre la retracción y la adición de humo de sílice en los hormigones canarios en el tiempo.

La adición de humo de sílice o microsílíce plantea serios problemas de retracción en hormigones sin adiciones, pues llega a aumentar la retracción hasta en un 321 %. Estos efectos se han reflejado en los resultados a fisuración estudiados en el apartado correspondiente (3.2.2)

### 3.2.3.5. Combinación de humo de sílice o microsílíce con fibra corta de polipropileno.

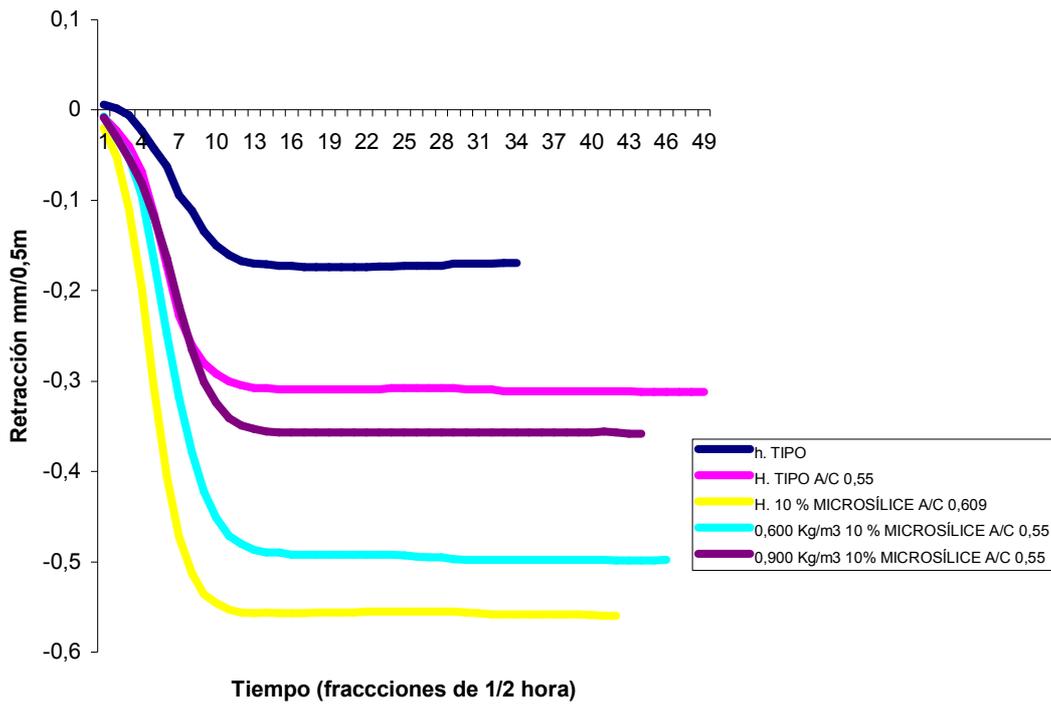


Fig.3.53. Gráfica de relación entre la retracción y la adición de humo de sílice, microfibras de polipropileno y reducción en la relación a/c en los hormigones canarios en función del tiempo.

### 3.2.3.5. Retracción en condiciones de evaporación de agua de fraguado por viento constante.

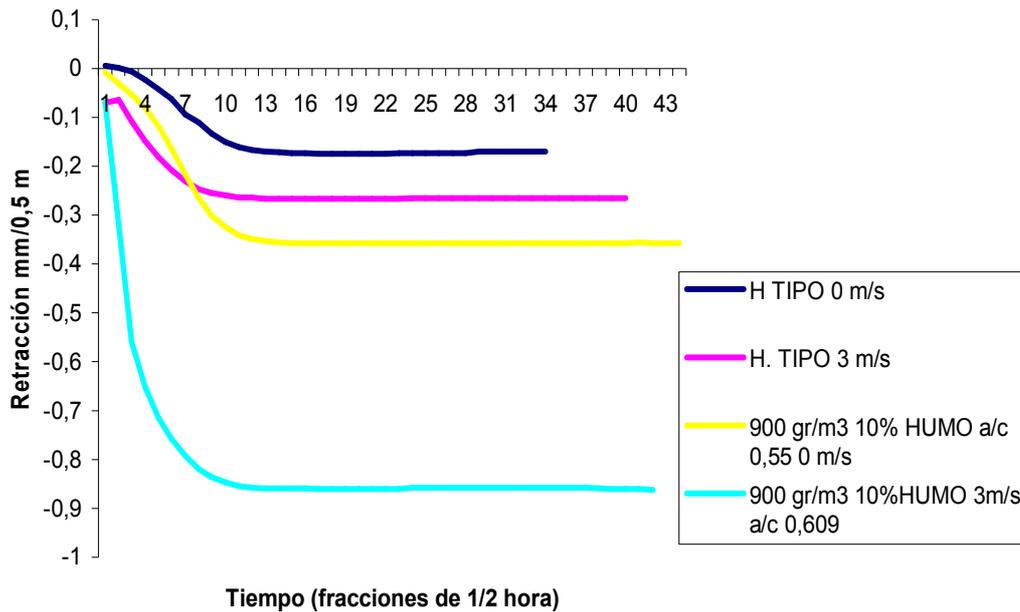


Fig. 3.54. Gráfica de relación entre la retracción en función del tiempo en series que varían la velocidad del viento.

El viento se plantea como parámetro muy negativo en el control de la retracción de los hormigones tanto sin adiciones como con estas. Podemos apreciar en presencia de éste un aumento significativo de la retracción hasta en un 75% en hormigones sin adiciones y hasta en un 110 % en hormigones con adiciones de humo de sílice y microfibras.

En resumen en cuanto al control de la retracción en condiciones de viento las muestras se han presentado muy sensibles, especialmente las que poseen adiciones.

A continuación representan un resumen de los distintos valores de retracción máxima obtenidos en las distintas series de hormigones, con parámetros de viento constante.

<b>REF. PROBETA</b>	<b>RETRACCIÓN SIN VIENTO (mm/m)</b>	<b>RETRACCIÓN CON VIENTO 3 m/s (mm/m)</b>
<i>H.T.</i>	0,348	0,550
<i>H.T.2.</i>	0,676	--
<i>H.F.1-300</i>	0,540	--
<i>H.F.1-600</i>	0,880	--
<i>H.F.2-600</i>	1,030	--
<i>H.F.1-900</i>	1,480	--
<i>H.F.2-900</i>	1,240	--
<i>H.F.1-1200</i>	1,280	--
<i>H.F.2-1200</i>	0,550	--
<i>H.S.1</i>	1,120	--
<i>H.S.F.2-600</i>	0,960	--
<i>H.S.F.2.-900</i>	0,730	1,72

*Tabla 3.47. Tabla resumen de valores máximos de retracción de hormigones avanzados con y sin viento.*

### 3.2.3.7. Variación en la relación a/c en hormigones con adiciones.

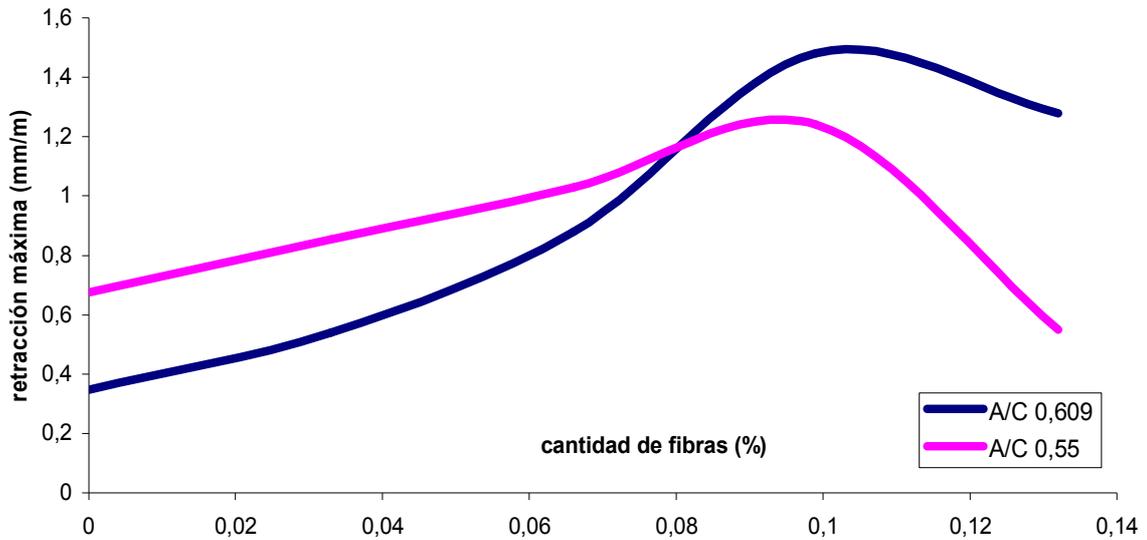


Fig. 3.55. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y la cantidad de microfibras de polipropileno adicionado a los hormigones con relaciones de a/c 0,609 y 0,55.

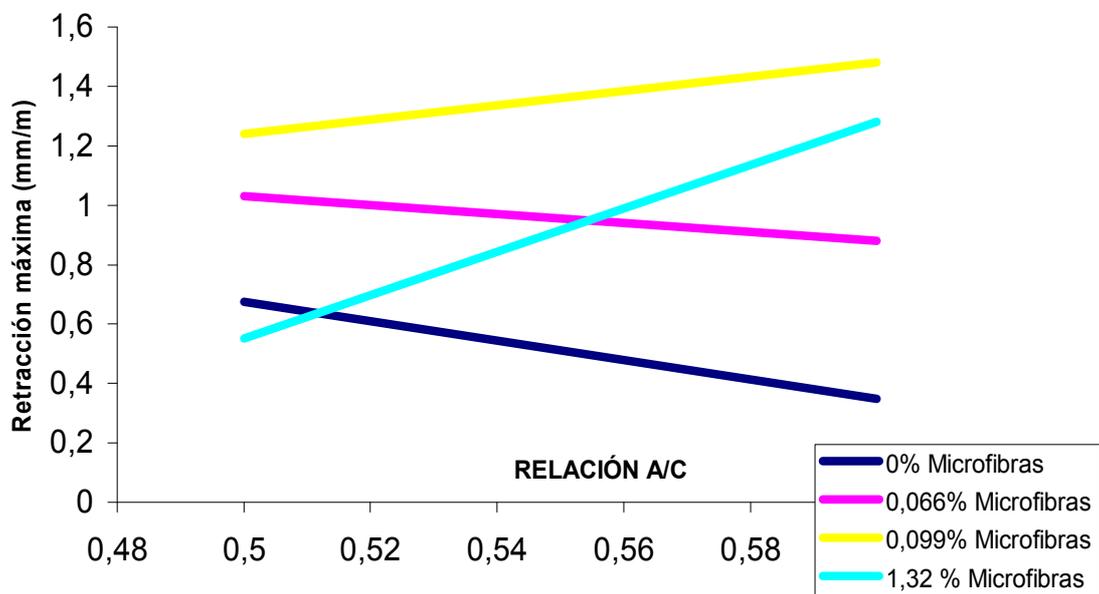


Fig. 3.56. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y influencia de la relación a/c en las distintas series de hormigones con fibras.

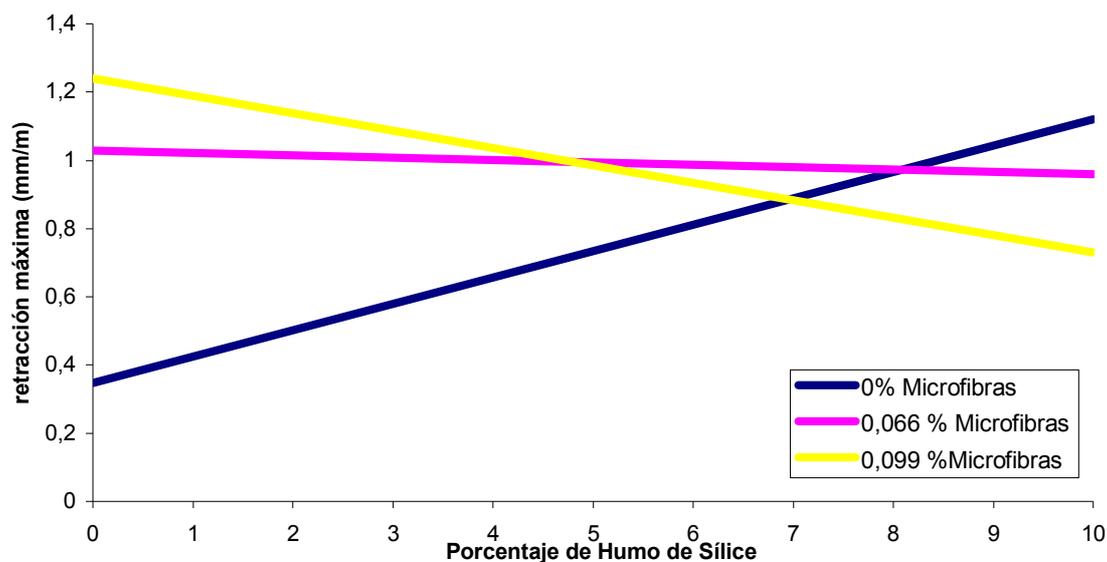


Fig. 3.57. Gráfica de relación entre el valor de retracción máxima y la cantidad de Humo de Sílice o microsíllice adicionado a los hormigones avanzados con las diferentes cantidades de microfibra en su interior.

### 3.2.3.8. Conclusiones.

En las gráficas de las figuras presentadas podemos apreciar una sensibilidad de las muestras a la adición de microfibras y a la disminución de la relación a/c.

En los hormigones sin fibras el efecto de adición de microsíllice produce un aumento de la retracción hasta en un 321 %, mientras que en los hormigones con adición de fibra corta de polipropileno este efecto es contrario, mejorando con el microsíllice este factor hasta un 10% en hormigones con 0,066% de adición de microfibras y un 66% en hormigones con 0,099% de adición de microfibra de polipropileno.

Al reducir la cantidad de agua en las series sin microfibras se produce un aumento de la retracción hasta en un 125%, mientras que en los que si poseen esta adición el efecto la reducción de agua es positivo para el control de la misma. En proporciones de fibra de un 0,66% la retracción aumenta muy poco, y se reduce en las

cantidades de 0,099% hasta en un 23 % y en las de 0,132% de adición de microfibras hasta en un 55%.

La reducción de agua produce un aumento de la retracción por el empleo de superplastificantes. Con cantidades de plastificantes constantes y de fibra como en la expuesta en la figura anterior se puede observar la mejora de la retracción con reducciones de la relación a/c.

### **3.2.4. La compacidad en los hormigones avanzados canarios.**

#### **3.2.4.1. Ensayos desarrollados.**

El estudio de la compacidad en los hormigones ha sido realizado empleando distintos ensayos independientes, que a su vez se pueden relacionar entre sí posteriormente.

Por un lado se ha empleado cada probeta a sido pesada, conociendo su volumen se determinaba su densidad aparente. Se ha estudiado la morfología de los distintos hormigones mediante microscopios para estudiar su estructura interna. También se ha determinado la velocidad de ultrasonido, con un pulsador de ultrasonidos y un medidor de la velocidad de propagación de onda. La velocidad de propagación es mayor en elementos más compactos y con mayor densidad, que posean menos discontinuidades en su masa. Por lo tanto la velocidad de ultrasonidos es proporcional a la compacidad del material y a su densidad, pudiendo marcarnos incluso heterogeneidades en la masa.

Esta velocidad de paso nos permite saber la densidad del material y calcular el módulo Es de ultrasonidos. Para la recogida de datos se colocan los pulsadores enfrentados en la pieza a medir, no directamente en contacto con la misma, sino a través de una vaselina. La medida de la probeta o distancia entre emisor y receptor se ajusta en el aparato medidor que toma el tiempo de paso de la señal, para saber así la velocidad.



*Fig.3.58. Imagen de equipo de medida de ultrasonidos usado en probeta prismática.*

Una vez pasados veintiocho días se procedió a estudiar la penetración de líquidos en el hormigón mediante agua a presión. El proceso que se siguió según la norma de AENOR (norma española) para ensayos en hormigón 83-310-90. Estas probetas deben a su vez desarrollarse y conservarse según la UNE 12390-8, realizándose la rotura por tracción indirecta según la UNE 83306.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

- Se tomaron las probetas cilíndricas a una edad mínima de 28 días.
- Se calculó la densidad aparente.
- Se ejercen presiones de  $P/3$ ,  $2P/3$  y de  $4P/3$  en periodos de 24 cada una. Siendo  $P$  la presión máxima aplicada en la dirección del hormigonado, con una incertidumbre de  $\pm 10\%$ . Las presiones finalmente empleadas son de 1, 3 y 7 atmósferas.
- Se anotó el momento de salida del agua permeada y la presión.
- En las que no salió se marcó el borde que describe la profundidad de penetración una vez rotas a tracción indirecta.

Esta norma se corresponde con la norma ISO/DIS 7032: “Béton durci-determination de la perméabilité”.



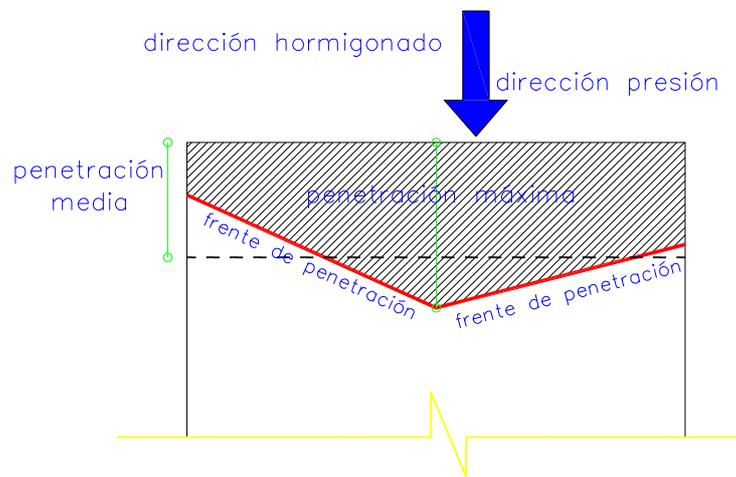
*Fig. 3.59. Imagen de máquina de ensayos para penetración de agua de PAS (Pavimentos Asfálticos Salamanca), vista de compresor y mesa de ensayos con cánulas de fijación.*



*Fig. 3.60 Imagen de máquina de ensayos para penetración de agua de PAS (Pavimentos Asfálticos Salamanca), vista cercana de cánulas de fijación para probetas cilíndricas de 15x30 cm<sup>2</sup>.*

En las probetas se estudia el frente de penetración como el lugar geométrico de los puntos hasta donde llega el agua al realizar el ensayo, la profundidad de penetración como la distancia existente entre cada uno de los puntos del frente de penetración y la superficie de la probeta sobre la que se aplica la presión de agua.

La profundidad máxima de penetración es el punto más alejado del borde donde se practica el ensayo, y la profundidad media de penetración se conoce como la profundidad resultante de efectuar el cociente entre el área encerrada por el frente de penetración y el diámetro o arista de la probeta; el área definida por el frente de penetración se determina sobre la superficie de fractura que resulta al efectuar el ensayo.

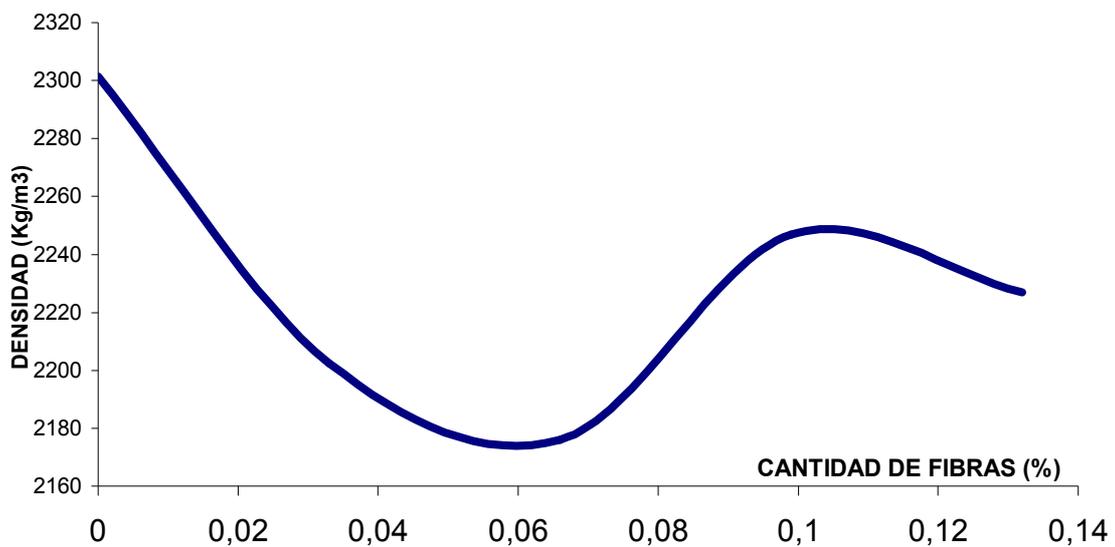


*Fig. 3.61. Imagen de resumen de los parámetros a obtener en ensayo de penetración de agua a presión. La zona rayada es el área total de penetración.*

**3.2.4.2. Densidad aparente en los hormigones canarios avanzados:**

<b>REF. PROBETA</b>	<b>DENSIDAD (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>H.T.</i>	2301,45
<i>H.T.2.</i>	2340,73
<i>H.F.1-300</i>	2202,41
<i>H.F.1-600</i>	2176,00
<i>H.F.2-600</i>	2292,96
<i>H.F.1-900</i>	2246,93
<i>H.F.2-900</i>	2260,89
<i>H.F.1-1200</i>	2226,93
<i>H.F.2-1200</i>	2289,19
<i>H.S.1</i>	2292,39
<i>H.S.F.2-600</i>	2309,94
<i>H.S.F.2.-900</i>	2280,01

*Tabla 3.48. Tabla resumen de valores de densidad en las distintas series de hormigones avanzados canarios.*



*Fig. 3.62. Gráfica de relación entre la densidad y la cantidad de fibras en el hormigón con relación de a/c constantes 0,609.*

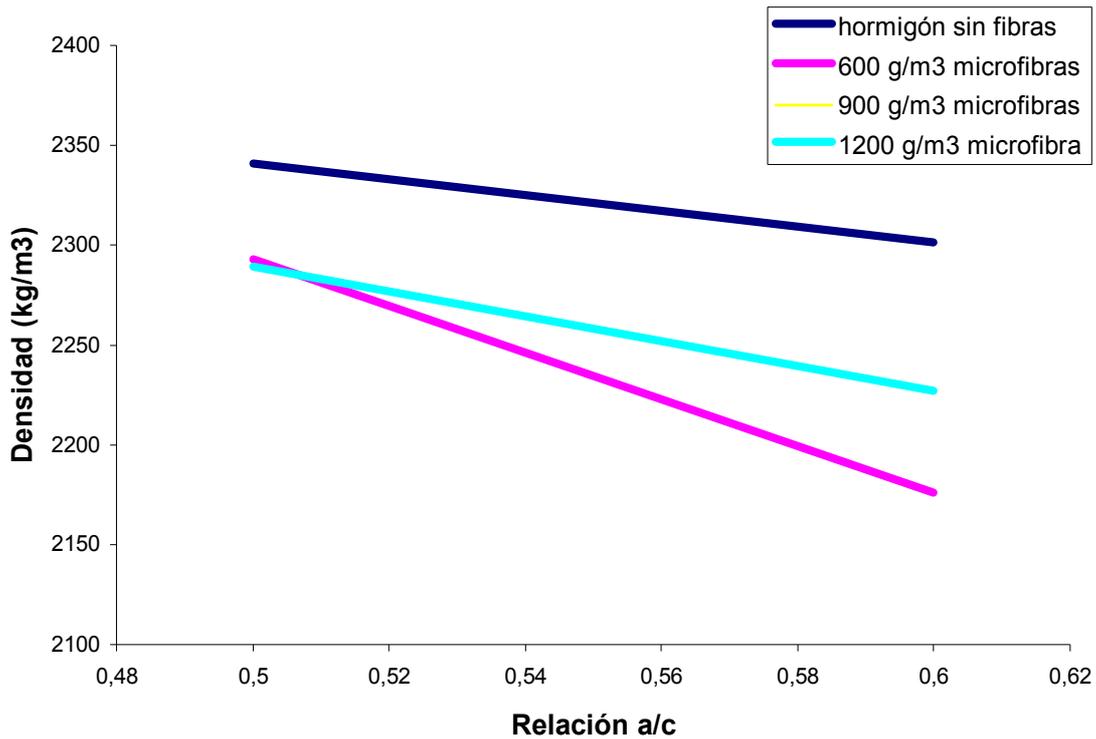


Fig. 3.63. Gráfica de relación entre la densidad y la relación a/c en los distintos hormigones con fibras en los que se ha pasado de una relación 0,609 a una relación 0,55.

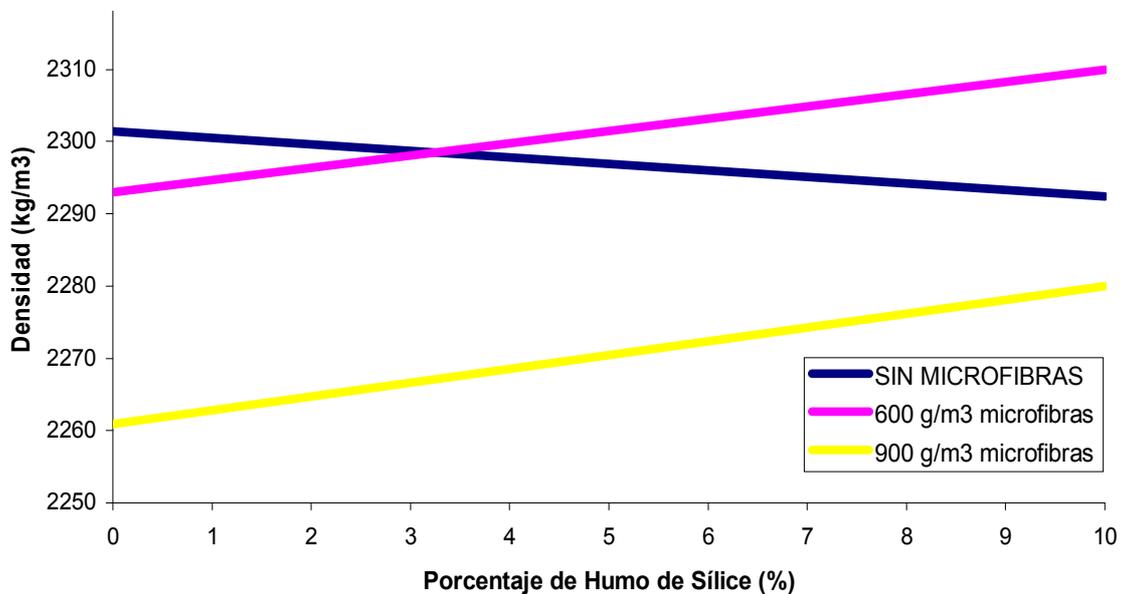


Fig. 3.63 Gráfica de relación entre la densidad y la adición de microsílíce o humo de sílice en los distintos hormigones con fibras en los que se ha pasado de una relación 0,609 a una relación 0,55 de a/c.

En general se aprecia una pérdida de densidad en los hormigones con adiciones de fibra de polipropileno como se observa en la figura anterior, de la que se puede deducir que ésta no es constante o progresiva, siendo menor en los hormigones con cantidades de fibra de  $600 \text{ g/m}^3$  y mayores en las de  $1200 \text{ g/m}^3$ .

En cambio con la reducción de agua en los hormigones se observa una mejora de las densidades tanto en los que poseen fibras como en los que no.

Mediante la adición de humo de sílice o microsílíce en los hormigones sin fibras se ha producido una pérdida de densidad, al contrario que en los hormigones con fibra corta de polipropileno que ha aumentado.

Las variaciones en las densidades en las distintas series son bastante pequeñas, en torno a un 1%, pero su efecto como veremos posteriormente es muy importante.

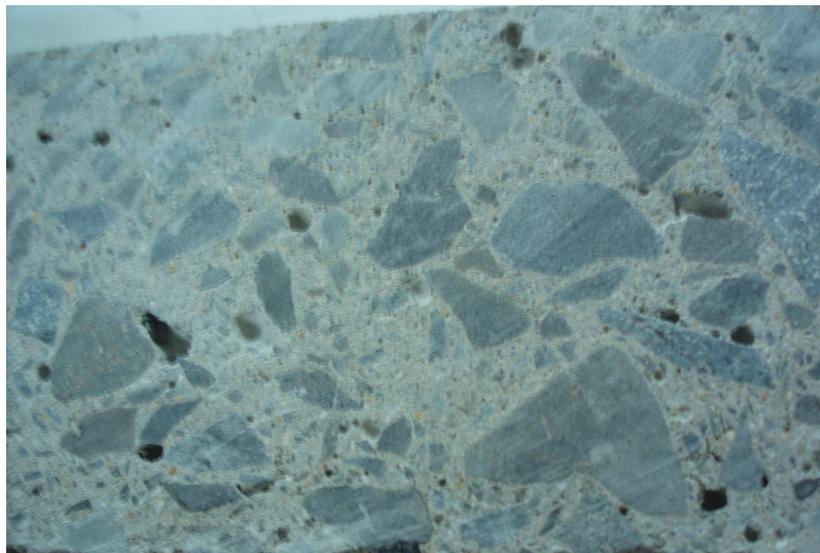
### 3.2.4.3. Microscopía en series de probetas.

De las losas doblemente coaccionadas se extrajeron probetas de 4x5x16 cm para ensayar posteriormente a flexión mediante corte con sierra circular con disco de diamante. Antes de efectuar los ensayos se fotografiaron con cámara digital de 3 aumentos (3x) los laterales de las mismas y se fotografiaron, posteriormente se efectuaron roturas articulándolas en ambos apoyos con carga central.

De las distintas probetas ensayadas se extrajeron muestras de 5x5x2 cm<sup>3</sup> para estudiar la morfología mediante microscopio óptico de doscientos aumentos (200x), obteniendo imagen digitalizada.

A continuación se muestran las imágenes de las probetas de las series más significativas a distintas escalas.

- Serie H.T.1.



*Fig.3.64. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo (HT1), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma.*

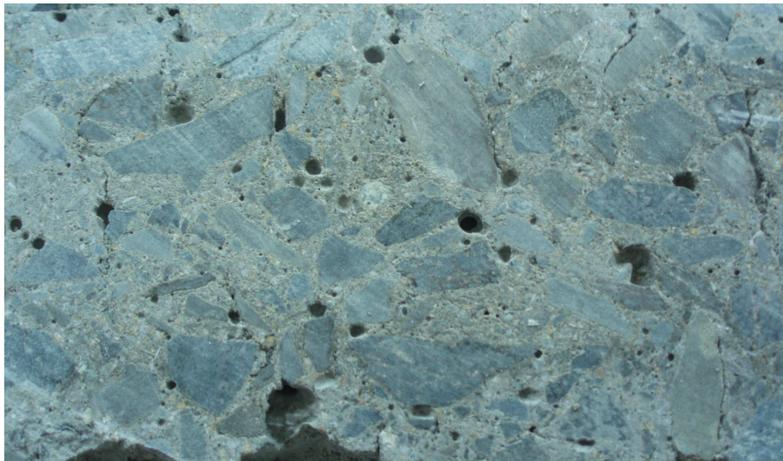
Si observamos la imagen primera podemos apreciar la forma tan irregular de los áridos y la dificultad de ordenación que posee el conjunto debido a esto. También podemos ver la cantidad de mortero de cemento y finos que hacen falta para colmatar el conjunto y ligar unos áridos con otros. También podemos ver los poros de diámetro

hasta 5mm en algunos casos generalmente atrapados entre dos áridos o en un lado convexo de alguno de éstos.



*Fig. 3.65. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo (HT1), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma.*

- **Serie H.T.2-600.**



*Fig.3.66. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. (HT1-600), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma.*



*Fig. 3.67. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. (HT1-600) en la que se observa la fibra en la cara de dos poros.*

En esta serie de probetas se observan los mismos problemas de poros incluidos en la masa aunque con una mayor cantidad de poros de menor tamaño debido a la utilización de superplastificantes en la misma. Se observa en la imagen obtenida mediante microscopio que la fibra sólo es visible en las caras de los poros, integrándose bien en la masa del hormigón.

- **Serie H.T.1-900.**



*Fig. 3.68. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. (HT1-900).*

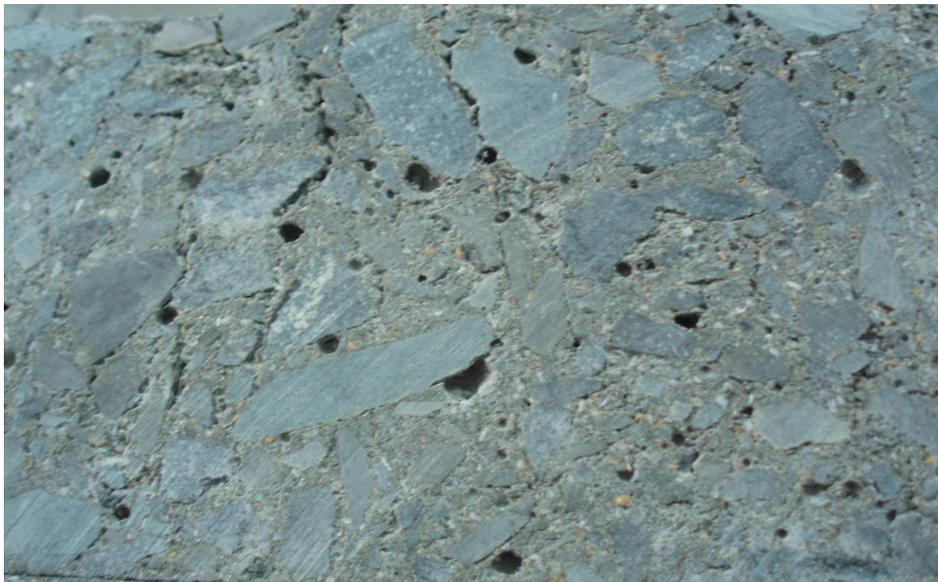
En ambas imágenes se puede observar el mismo aspecto por la inclusión de burbujas de aire de pequeño tamaño en la masa del hormigón por efecto del empleo del superplastificante.

En la primera imagen se observa un poro de diámetro 2mm y a su lado poros de diámetro menor al milímetro, separados por mortero de cemento y arena. Como es habitual se aprecia la fibra empleada en estas series en estas zonas de discontinuidad. En los poros de menor tamaño la fibra “cose” estos espacios.



*Fig.3.69. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. (HT1-900).*

- **Serie H.S.F.2-600.**



*Fig.3.70. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P. Y 10% H.S. con relación a/c 0,5 (H.S.F.2-600), obtenida mediante corte con circular en la que se aprecia el interior de la misma.*



*Fig. 3.71. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600).*



*Fig.3.72. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600).*



*Fig.3.73. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600).*



*Fig. 3.74. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,066% de F.P.; 10% H.S. y a/c 0,50 (H.S.F.2-600).*

En estas series con humo de sílice podemos apreciar principalmente una desunión entre árido y matriz cementosa, aspecto este contrario al de partida. Los

granos de cemento y de arena parecen estar muy compactos unos con otros pero permiten zonas de discontinuidad con los áridos de mayor tamaño.

Estas discontinuidades se prolongan algo más que el ámbito del árido, llegando incluso a continuar por las caras de otros áridos cercanos. Esta serie posee una reducción de agua de a/c 0,609 se ha pasado a A/C 0,50, aumentando la cantidad de superplastificante.

Al contrario que en otras series si se observa una mayor proporción de áridos que de lechada de cemento.

- **Serie H.S.F.1-900.**



*Fig. 3.75. Imagen mediante cámara digital 3x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P. Y 10% H.S. con relación A/C 0,6 (H.S.F.1-900).*



*Fig. 3.76. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900).*



*Fig. 3.77. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900).*



*Fig. 3.78. Imagen mediante microscopio óptico de 200x de cara de probeta de Hormigón tipo con 0,099% de F.P.; 10% H.S. y A/C 0,60 (H.S.F.1-900).*

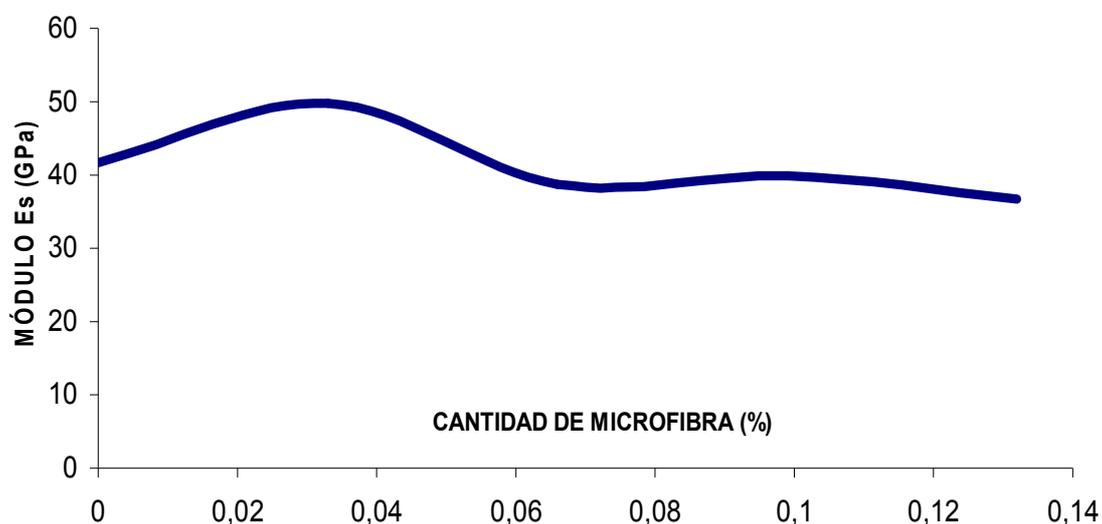
En la primera imagen de esta serie podemos ver el conjunto de las tres probetas prismáticas previo al ensayo a flexión. En la segunda imagen podemos apreciar como se ha formado un poro en la unión de varios áridos uno de ellos de menor tamaño en forma de punta que no permite el acceso de lechada de cemento.

En la tercera imagen se observa una zona discontinua con fibra de polipropileno que parece ser la causante. En la última se observa la masa que bordea un poro más compacta que las anteriores y una serie de microfibras de lado a lado de un poro.

**3.2.4.4. Velocidad de propagación de ultrasonidos en los hormigones avanzados canarios:**

<b>REF. PROBETA</b>	<b>VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/s)</b>	<b>MÓDULO DE ULTRASONIDOS Es (GPa)</b>
<i>H.T.</i>	4250	41,7
<i>H.T.2.</i>	4398	42,5
<i>H.F.1-300</i>	4256	39,8
<i>H.F.1-600</i>	4215	38,7
<i>H.F.1-900</i>	4168	39,9
<i>H.F.1-1200</i>	4100	36,7
<i>H.S.1</i>	4120	40,8
<i>H.S.F.2-600</i>	4225	40,9
<i>H.S.F.2-900</i>	4240	41,0

*Tabla 3.49. Tabla resumen de resultados de velocidad de propagación de onda y módulo de ultrasonidos en las distintas series de hormigones avanzados canarios.*



*Fig.3.79. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la cantidad de microfibras adicionada al hormigón.*

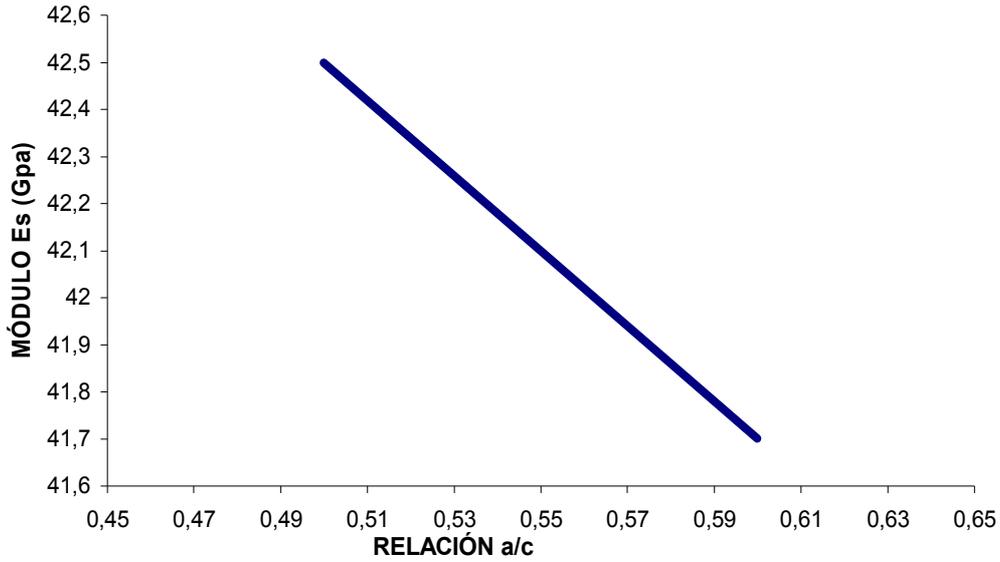


Fig. 3.80. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la relación a/c.

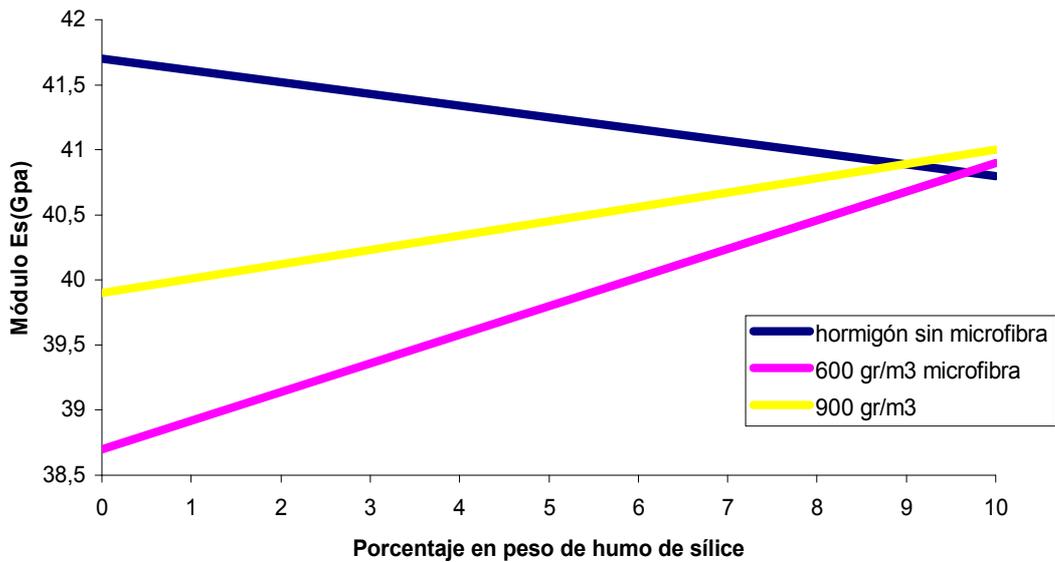


Fig.3.81. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos y la cantidad adicionada de humo de Sílice o microsílíce.

La adición de microfibras en los hormigones en relación con el módulo de ultrasonidos Es, nos ha dado datos no esperados al no existir una relación directa ni tendencia definitiva. Se observa un pequeño aumento de estos valores en las cantidades de 300 gr/m<sup>3</sup>, pero disminuye con el aumento de las cantidades de fibra de polipropileno incluso por debajo del valor del hormigón tipo.

Este factor en referencia a otras investigaciones como las de M.C. Nataraja (24) diverge por el tipo de fibra empleada, pues se empleó una fibra de acero, con la que se obtuvo el efecto contrario, aumentándose los valores de velocidad con su inclusión en la masa de hormigón. Esto puede deberse a que la densidad de la propia fibra de acero es mayor que la de polipropileno, facilitando la transmisión de onda por la masa del hormigón.

La reducción de agua al igual que con las densidades produce aumento de los valores de módulo de ultrasonido.

Mediante la adición de humo de sílice o microsílíce podemos observar como en los hormigones sin fibras la disminución del valor del módulo de ultrasonidos nos indica la pérdida de compacidad. Este efecto es contrario en los hormigones con fibra corta de polipropileno al aumentar la compacidad al igual que con las densidades aparentes al adicionarles humo de sílice.

**3.2.4.5. Penetración de líquidos sometidos a presión en los hormigones avanzados canarios:**

Resultados de penetración de agua:

<b>REF. PROBETA</b>	<b>PENETRACIÓN MÁXIMA (cm)</b>	<b>PENETRACIÓN MEDIA (cm)</b>	<b>ÁREA ENCERRADA (cm<sup>2</sup>)</b>
H.T.	3,90	3.90	58.90
H.T.2.	4,46	4.23	63.45
H.F.1-300	4,50	3.90	58.50
H.F.1-600	3,90	2.95	39.97
H.F.2-600	3,32	2.82	42.30
H.F.1-900	3,50	3.50	52.50
H.F.2-900	3,15	3.50	52.50
H.F2-900*mal refrentada	7,63	--	--
H.F.1-1200	4,60	3.33	49.50
H.F.2-1200	4,00	3.50	52.50
H.S.1	5,80	5.80	87.00
H.S.F.2-600	3,33	2.66	39.97

*Tabla 3.50. Tabla resumen de resultados de penetración máxima, media y valores de área encerrada dentro del frente de penetración en las distintas series de hormigones avanzados canarios.*

<b>REF. PROBETA</b>	<b>PENETRACIÓN MÁXIMA (cm)</b>	<b>PENETRACIÓN MEDIA (cm)</b>	<b>ÁREA ENCERRADA (cm<sup>2</sup>)</b>
M1	8,0	--	--
M3* Mal refrentada.	0,5	--	--
M4**penetración lateral	3,2	--	--
M5	9,5	--	--

*Tabla 3.51. Tabla resumen de resultados de penetración máxima en serie H.F.2-900 con defectos en las probetas donde se puede observar la diferencia de resultados, desechando los que han tenido problemas de refrentado o pérdida lateral de agua.*



Fig. 3.82. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con fallo de penetración lateral en la serie H.F.2-900.

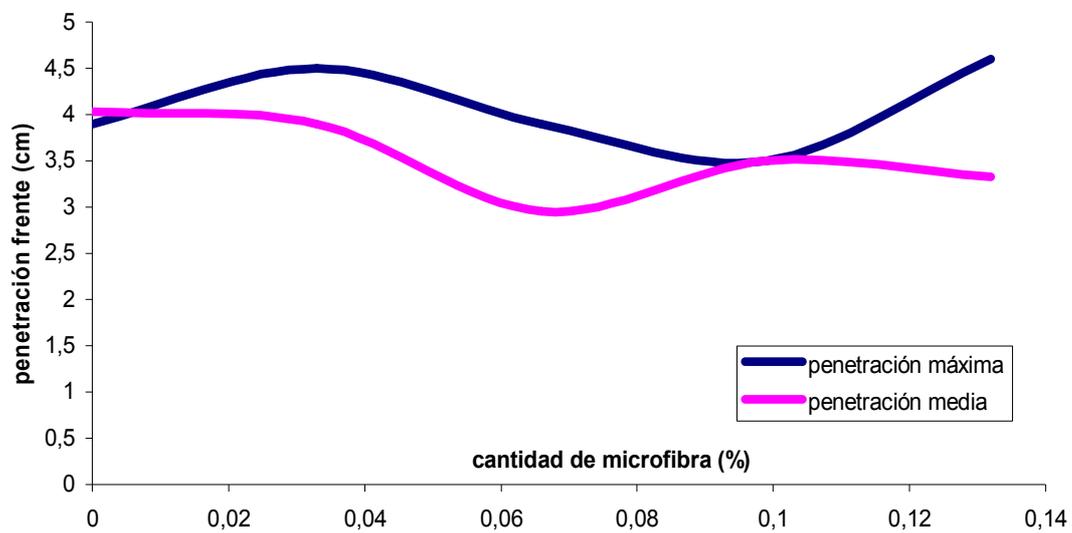


Fig. 3.83. Gráfica de relación entre la penetración del frente tanto máxima como media y la cantidad de microfibras adicionadas.

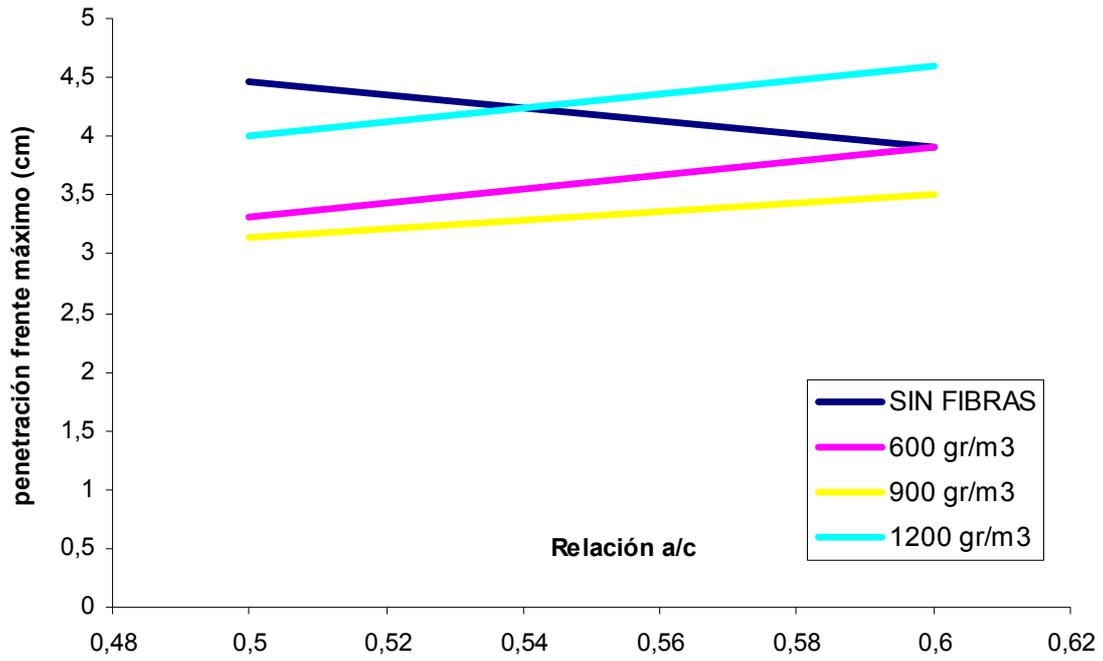


Fig. 3.84. Gráfica de relación entre la penetración del frente máximo y la cantidad de relación de a/c.

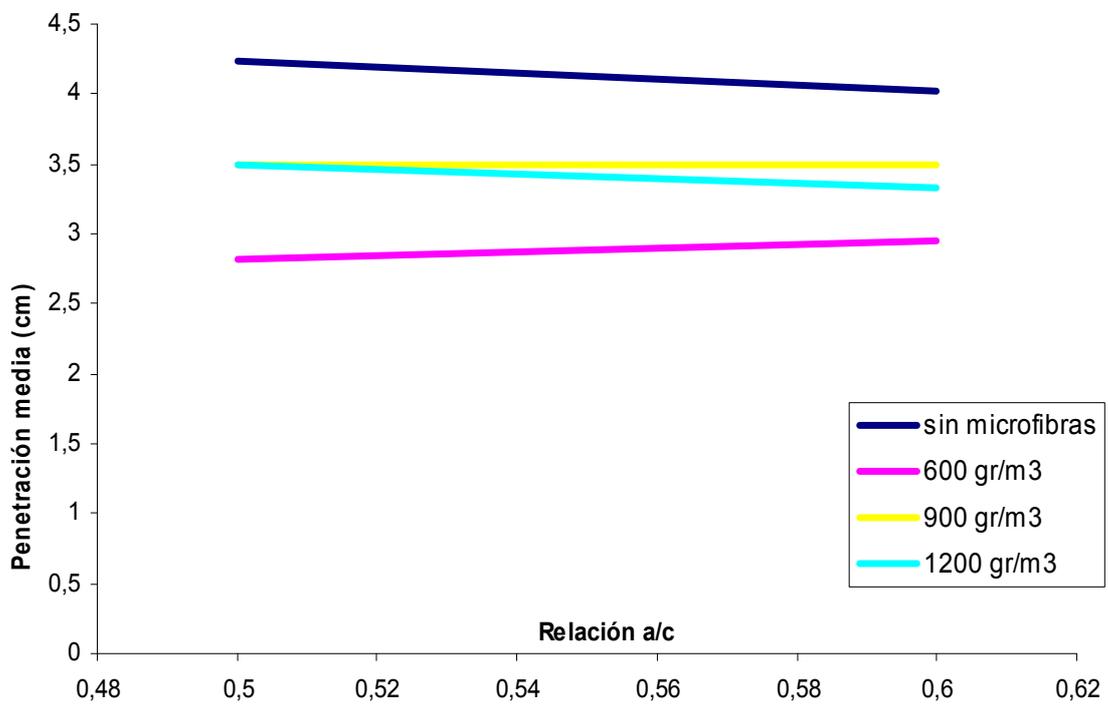


Fig. 3.85. Gráfica de relación entre la penetración del frente medio y la cantidad de relación de a/c.

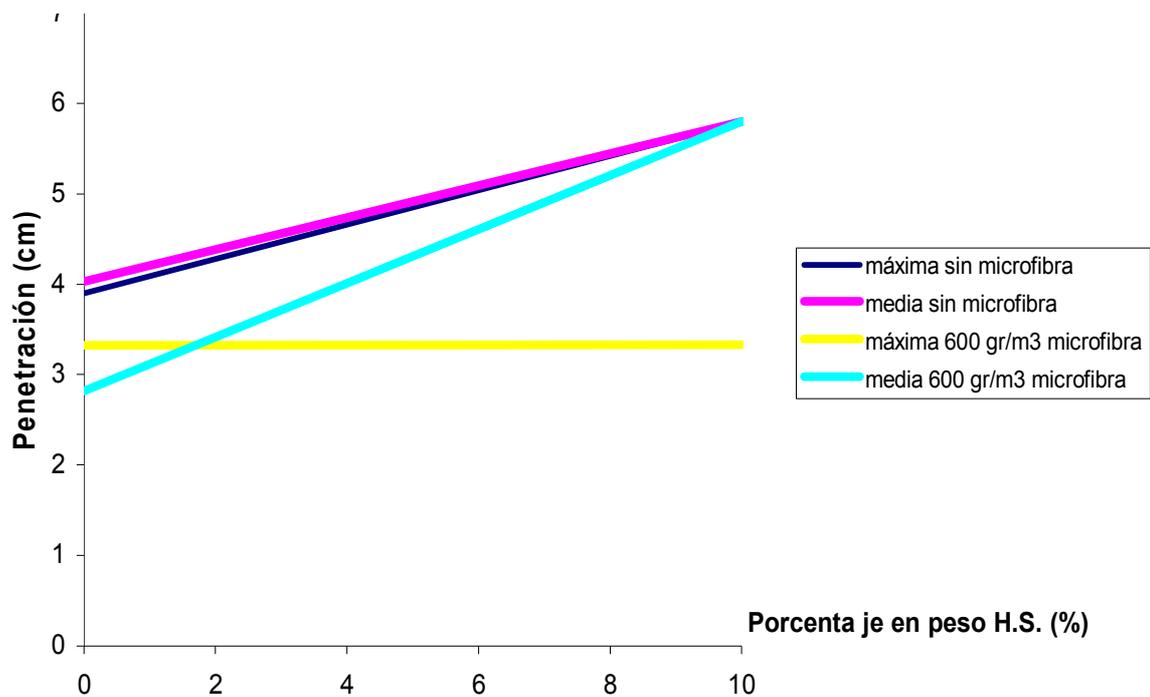
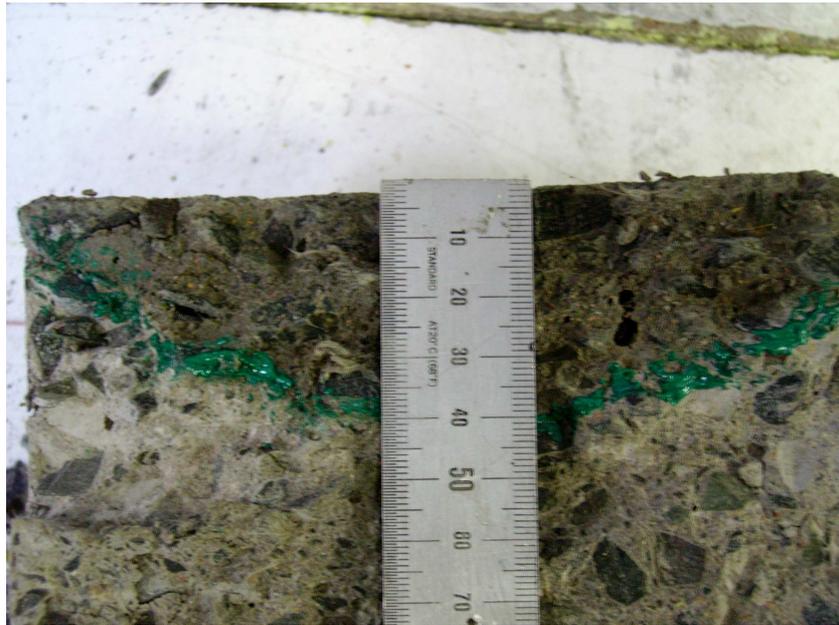


Fig. 3.86. Gráfica de relación entre la penetración del frente máximo y medio con la cantidad de humo de sílice o microsíllice adicionado.

En primer lugar se puede observar como la relación entre la profundidad de penetración máxima y mínima del frente no son siempre proporcionales, o que incluso no guardan relación. Como se explicó en el proceso de ensayo, la penetración máxima es puntual y puede corresponder a un defecto de la probeta, mientras que la profundidad media tiene que ver con el área total que penetra en la probeta. Se observa que en algunas probetas el frente es muy plano u homogéneo, mientras que en otras aparecen picos, generalmente en el eje de la probeta. En los casos de línea horizontal del frente los valores máximos y medios serán muy parecidos o iguales.



*Fig. 3.87. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con frente de penetración en forma triangular.*



*Fig. 3.88. Imagen de probeta ensayada a penetración de agua a presión con frente de penetración horizontal.*

La adición de fibra corta de polipropileno produce una mejora en la penetración de agua a presión, aunque de manera irregular. Se han conseguido valores óptimos en cantidades de  $600 \text{ gr/m}^3$  tanto en lo que se refiere a la profundidad máxima como a la media como se recoge en la figura presentada anteriormente.

La reducción de agua es más efectiva en las series con adiciones de microfibras de polipropileno que en aquellas sin este elemento, en las que se produce el efecto contrario. Se aprecia como en el hormigón tipo hay un aumento de un 12% en la penetración tanto máxima como media. La adición de fibras óptima en cuanto a esta reducción de la relación a/c es la de  $900 \text{ g/m}^3$  en cuanto al frente máximo y  $600 \text{ g/m}^3$  en el frente medio.

En cambio la adición de Humo de Sílice produce en todos los casos mayores profundidades en los frentes medios y máximos de penetración, aunque en menor medida en los adicionados a su vez con microfibras.

#### **3.2.4.6. Conclusiones.**

Se establece correspondencia en los comportamientos de las densidades observadas mediante pesado y los módulos de ultrasonidos establecidos posteriormente. No obstante no siempre es directamente proporcional, aunque la tendencia de resultados es similar. En general las pérdidas de densidades aparentes se encuentran en factores del 1% y en cuanto a módulos de ultrasonido menor a 0,5 %.

La adición de humo de sílice es más efectiva en hormigones con fibra corta de polipropileno, mejorando los valores de partida y eliminando los efectos negativos en densidad y módulo de ultrasonidos de los hormigones sólo con fibras.

REF. PROBETA	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	MÓDULO Es (GPa)	PENETRACIÓN MÁXIMA (cm)	PENETRACIÓN MEDIA (cm)
<i>H.T.</i>	2301,45	41,7	3,90	3.90
<i>H.T.2.</i>	2340,73	42,5	4,46	4.23
<i>H.F.1-300</i>	2202,41	39,8	4,50	3.90
<i>H.F.1-600</i>	2176,00	38,7	3,90	2.95
<i>H.F.2-600</i>	2292,96	--	3,32	2.82
<i>H.F.1-900</i>	2246,93	39,9	3,50	3.50
<i>H.F.2-900</i>	2260,89	--	3,15	3.50
<i>H.F.2-900 *</i>	2260,89	--	7,63	--
<i>H.F.1-1200</i>	2226,93	36,7	4,60	3.33
<i>H.F.2-1200</i>	2289,19	--	4,00	3.50
<i>H.S.1</i>	2292,39	40,8	5,80	5.80
<i>H.S.F.2-600</i>	2309,94	40,9	3,33	2.66
<i>H.S.F.2-900</i>	2280,01	41,0	--	--

Tabla 3.52. Tabla resumen de los distintos parámetros para indicar la compacidad y permeabilidad de los hormigones avanzados.

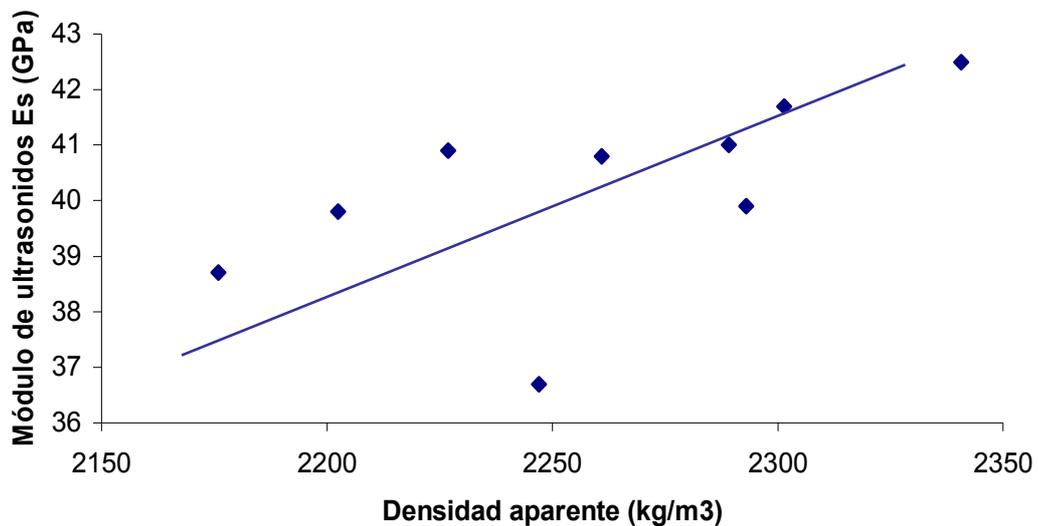


Figura 3.89. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos (Es) y la densidad aparente de las distintas probetas.

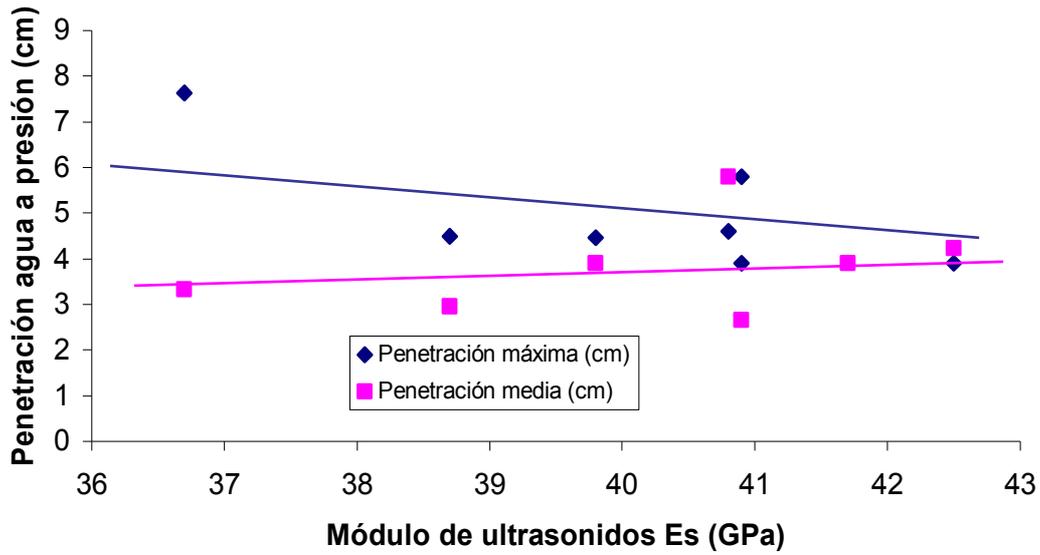


Fig. 3.90. Gráfica de relación entre el módulo de ultrasonidos ( $E_s$ ) y la penetración máxima y media en probetas ensayadas con agua a presión.

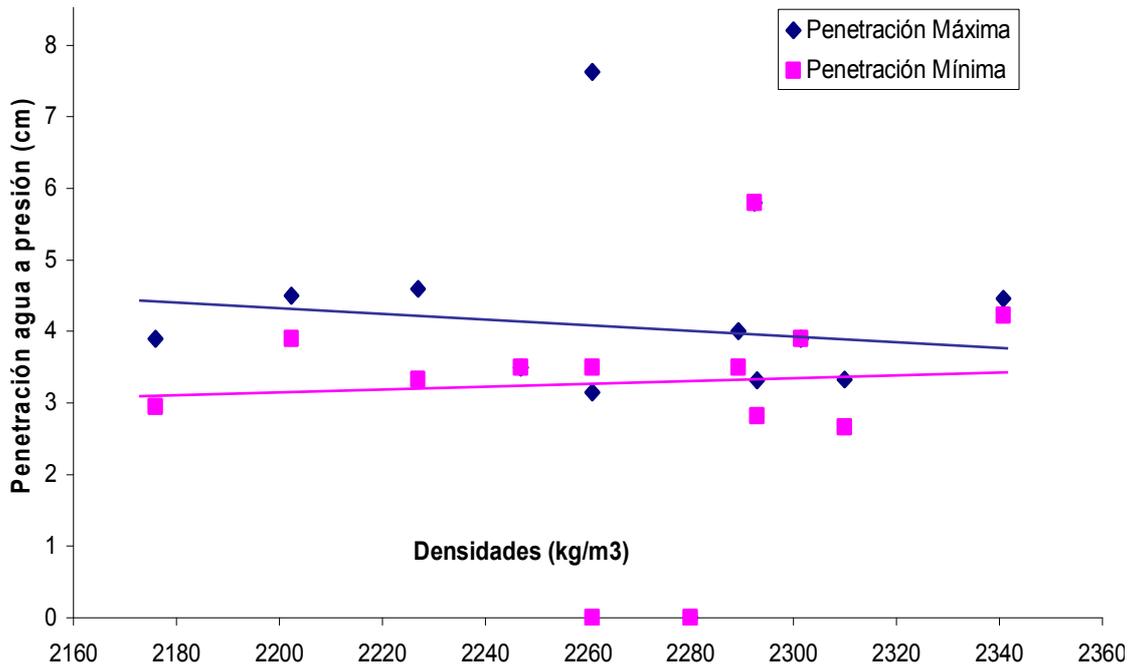


Fig. 3.91 Gráfica de relación entre los frentes de penetración de agua a presión y las densidades aparentes de las distintas series de hormigón avanzado.

Según los parámetros estudiados en la obtención de valores de compacidad y permeabilidad podemos afirmar que existe relación entre las densidades aparentes de los

hormigones y el módulo de ultrasonidos. En la gráfica que relaciona estos dos parámetros se aprecia una mejoría de los valores de ultrasonidos con el aumento de las densidades.

Cuando se relaciona permeabilidad con densidad aparente y módulo de ultrasonidos podemos apreciar la leve mejora de la permeabilidad con el aumento de ambos factores. Se aprecia que es la cara externa del hormigón la que marca la entrada de agentes ajenos en mayor medida que la morfología interna del propio material.

### **3.3. MEJORA EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS.**

#### **3.3.1. La carbonatación en los hormigones avanzados canarios.**

##### **3.3.1.1. Ensayos desarrollados.**

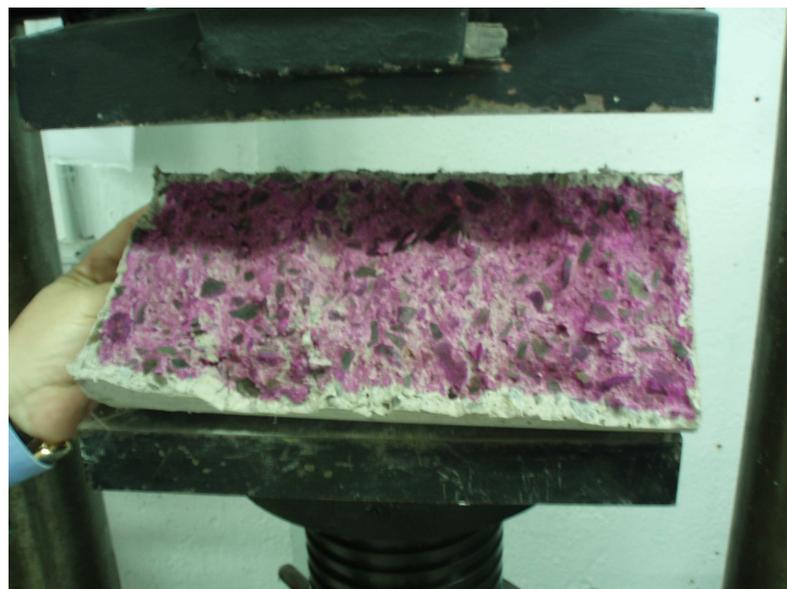
Los ensayos de comprobación de la carbonatación de los hormigones se han realizado con fenoftaleína en disolución de etileno al 90 %. Se trata de un indicador de pH aplicado mediante pulverización en el hormigón y que marca con colores magenta de mayor a menor intensidad según este sea de valores más a menos ácidos las muestras.

Se ha empleado en probetas almacenadas en el exterior, expuestas a la lluvia y al sol, durante dos años para facilitar la entrada de dióxido de carbono en su interior y que de esta manera la carbonatación sea mayor. Las condiciones de exposición han sido las de Madrid, que a pesar de no ser similar a la de Canarias el contenido de dióxido de carbono es más elevado y las condiciones mejores para el ensayo.



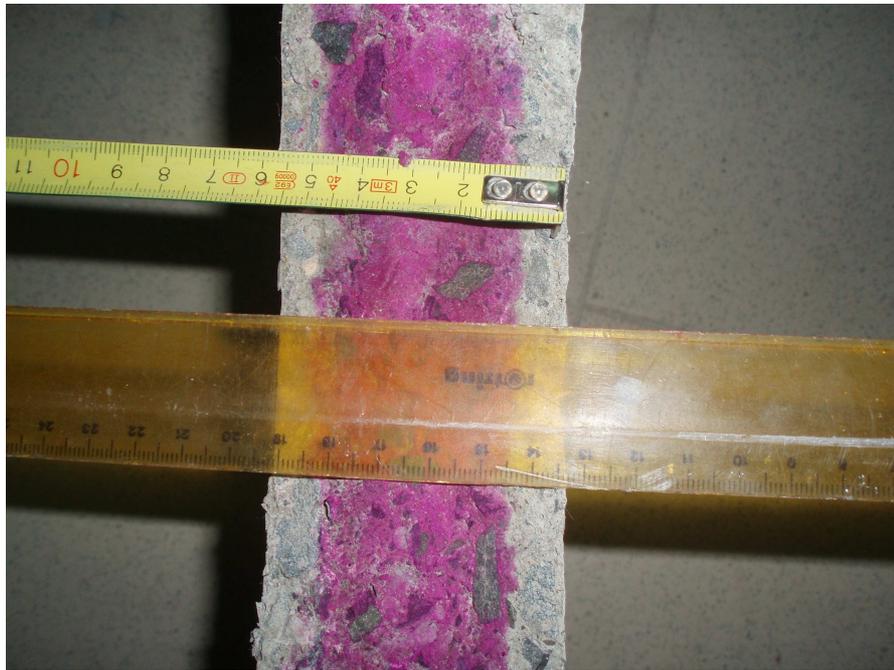
*Fig. 3.92. Imagen de indicador de pH y etileno con probeta fragmentada a ensayo brasileño y posteriormente rociada con disolución de fenoftaleina.*

Posteriormente a esta exposición las probetas han sido fragmentadas en su cara central y rociadas inmediatamente con la fenoftaleina inmediatamente. Las zonas marcadas con el color magenta son las que aún no han sufrido carbonatación, dejando una zona sin marca desde la cara externa de la probeta hacia el interior que es la carbonatada.



*Fig. 3.93. Imagen de probeta ensayada a brasileño y rociada con spray indicador de Ph a base de fenoftaleina.*

Se ha marcado y medido el ancho del límite de la zona carbonatada, tanto el máximo como el mínimo de la probeta. Se ha empleado principalmente las losas Kraai empleadas a flexión e impacto, y probetas cilíndricas.



*Fig. 3.94. Imagen de losa fragmentada a impacto, rociada con spray indicador de Ph a base de fenofaleina. Medición de ancho de carbonatación.*

### 3.3.1.2. Valores máximo y mínimo de ancho de carbonatación.

<b>NUMERO DE SERIE</b>	<b>VALOR MÁXIMO DE ANCHO DE CARBONATACIÓN (cm)</b>	<b>VALOR MÍNIMO DE ANCHO DE CARBONATACIÓN (cm)</b>
Serie H.T.1	1,50	1,00
Serie H.T.2	0,50	0,40
Serie H.F.2.-600	0,50	0,20
Serie H.F.1.-900	1,00	0,80
Serie H.F.2.-900	1,00	0,20
Serie H.F.1.-1200	1,50	1,20
Serie H.S.1.	--	--
Serie H.S.F.1-600	1,00	0,70
Serie H.S.F.2-600	1,50	0,75
Serie H.S.F.3-600	1,50	1,00
Serie H.S.F.1-900	1,00	0,20

*Tabla 3.53. Tabla resumen de resultados de penetración máxima y mínima de carbonatación en hormigones mejorados canarios.*

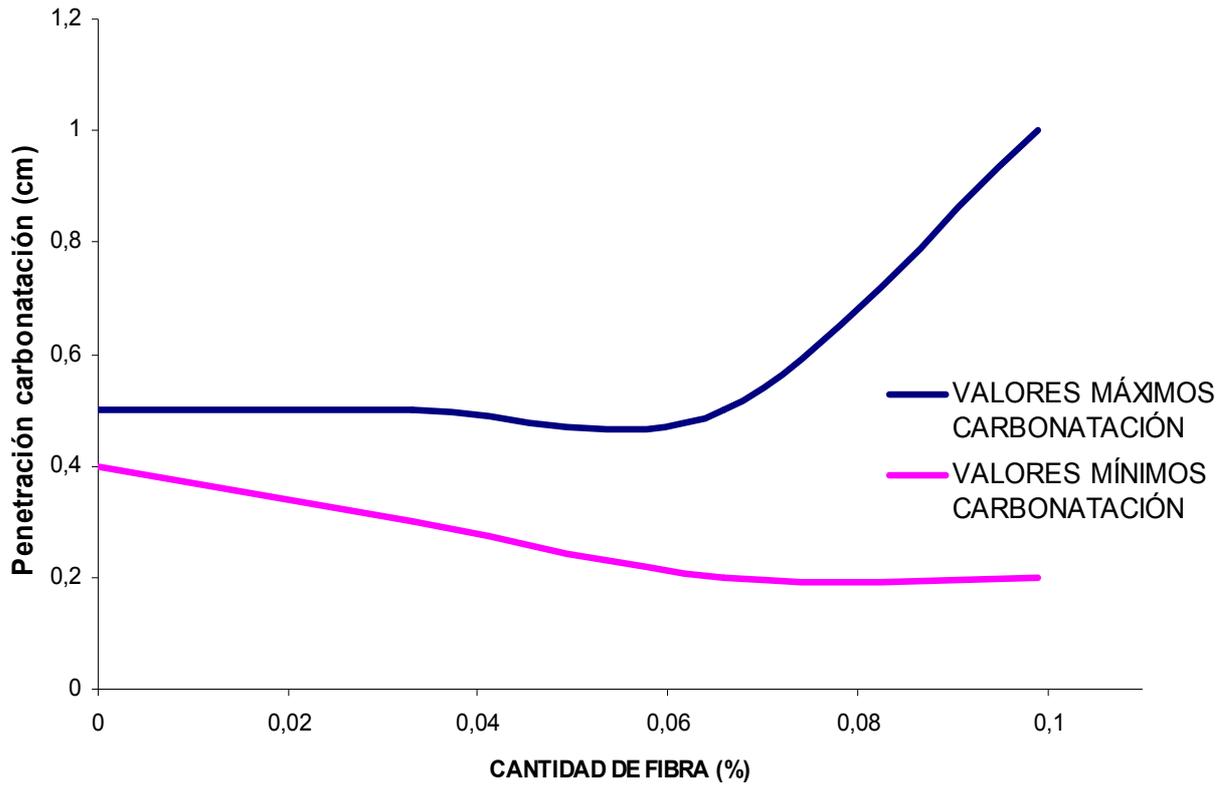


Fig. 3.95. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima con la cantidad de fibra añadida al hormigón.

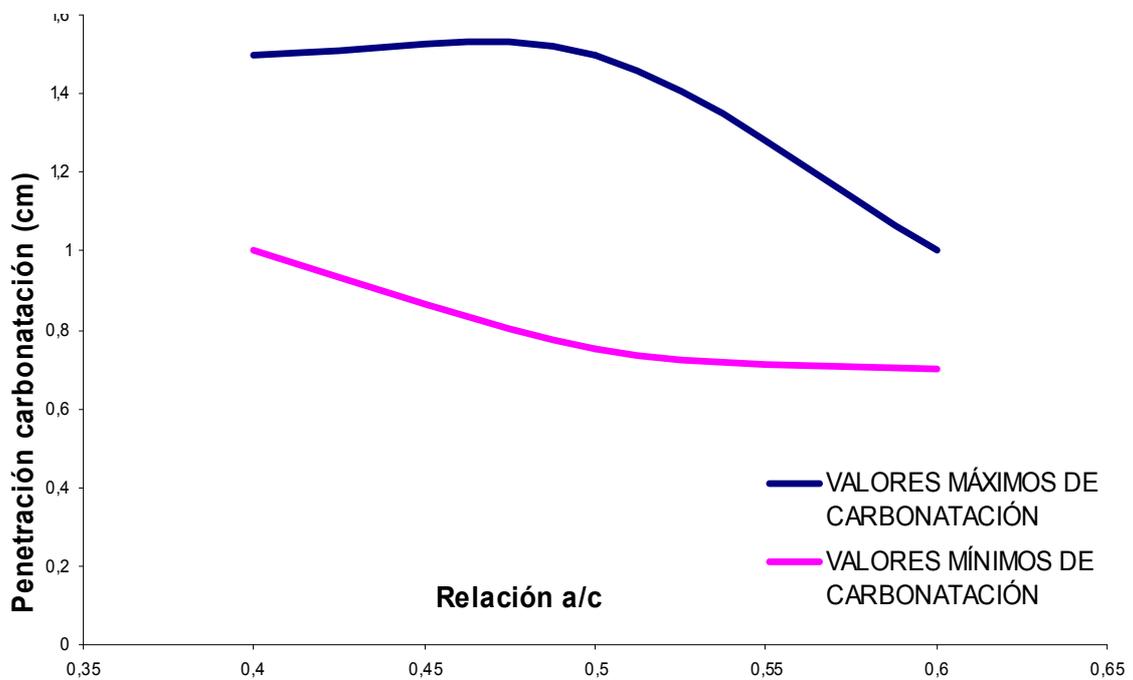
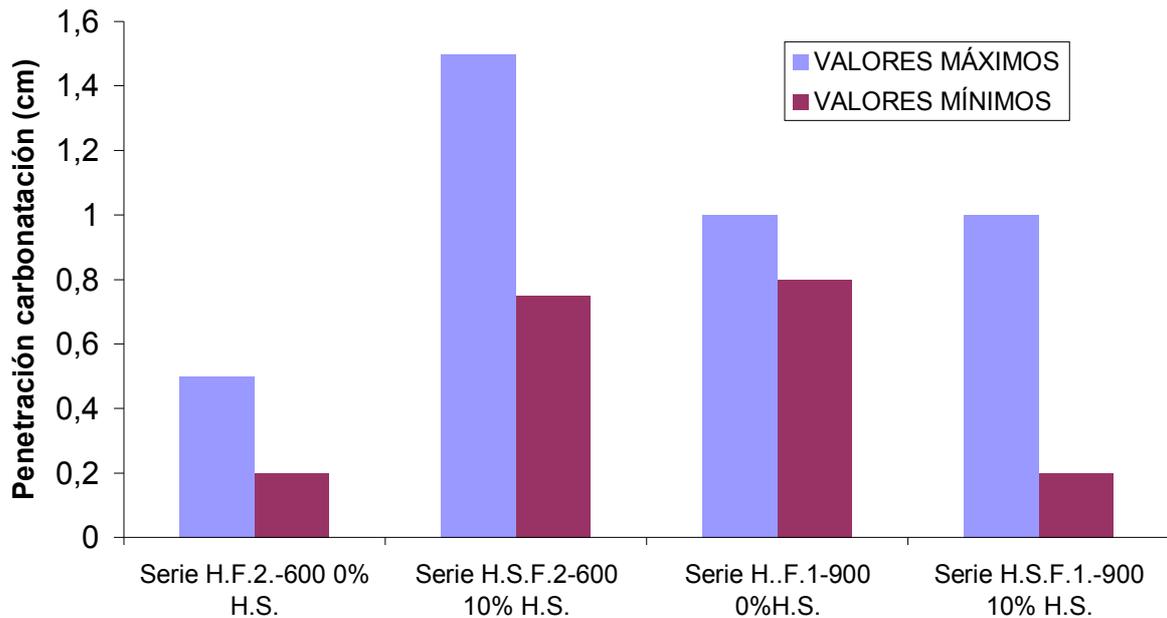


Fig. 3.96. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima con la relación a/c.



*Fig.3.97. Gráfica de relación entre la penetración de carbonatación máxima y mínima en series con y sin humo de sílice con cantidades de agua y fibra iguales.*

### **3.3.1.3. Conclusiones.**

En general los valores obtenidos han sido satisfactorios e incluso mejores que los de partida. El tiempo en el que las probetas han sido expuestas al exterior, dos años, no es demasiado dilatado, aunque si significativo en cuanto al comportamiento futuro de los hormigones.

Mediante el estudio se han establecido tres líneas de mejora y variación de la serie base u hormigón tipo: la adición de fibras, la reducción de la relación agua/cemento y la adición de humo de sílice.

Por un lado se ha incluido en los hormigones canarios fibra corta de polipropileno. Se puede establecer que la inclusión de éstas no afecta o incluso mejora el comportamiento futuro del hormigón en cuanto a la carbonatación de la pieza. Se han conseguido valores estables en los anchos máximos, mientras que en los valores mínimos de penetración se ha mejorado con la adición de fibra. El valor óptimo de cantidad de fibra es de un 0,066%, con una reducción de hasta un 50% en el valor mínimo de ancho de carbonatación y estable en cuanto al máximo ancho de carbonatación. El porcentaje de adición de microfibras de 0,099% es menos regular con

un aumento del valor máximo del ancho de penetración. Este logro es un aspecto secundario o no buscado a partir de la adición de fibra.

El efecto de la carbonatación por la disminución de la relación de agua se ha realizado en hormigones con un porcentaje de microfibra de 0,066%. Se han obtenidos valores negativos con la disminución de la cantidad de agua en las series de hormigón. Esto se puede deber principalmente a la segregación o mala ejecución de las probetas debido a la consistencia seca de las muestras. La reducción de un 20% de agua produjo aumentos en el valor máximo de penetración de CO<sub>2</sub> hasta en un 50% y el valor mínimo hasta en un 18%.

En cuanto a la adición de humo de sílice se ha producido una reacción dispar en las diferentes series de probetas. En las series con 0,066% de microfibra la adición de microsílíce ha producido un aumento de los valores de anchos mínimos y máximos, mientras que en las series con 0,099% los valores han sido contrarios, por tanto no podemos establecer una línea clara en este aspecto. El trabajo conjunto de microfibras de polipropileno y de microsílíce es más efectivo en el control de la carbonatación que por separado.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES

#### 4.1 Relación entre las distintas propiedades ensayadas.

Se ha notado una mejora en los hormigones con el empleo de los materiales adicionados, humo de sílice y microfibras de polipropileno, y se ha estudiado la afección de éstas en los hormigones. A continuación se relacionan entre sí los resultados de los ensayos para el estudio de las propiedades físicas y químicas ya realizados y analizados individualmente en los capítulos anteriores.

##### 4.1.1. Relación entre capacidades mecánicas y compacidad.

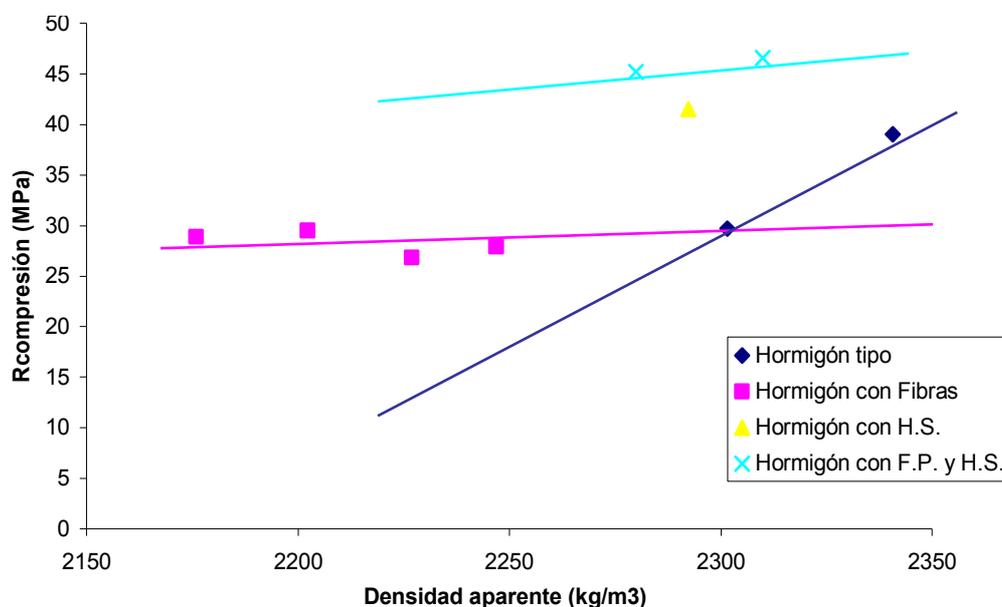


Fig. 4.01. Gráfica de relación entre las resistencias a compresión y la densidad de las distintas series con distintas adiciones.

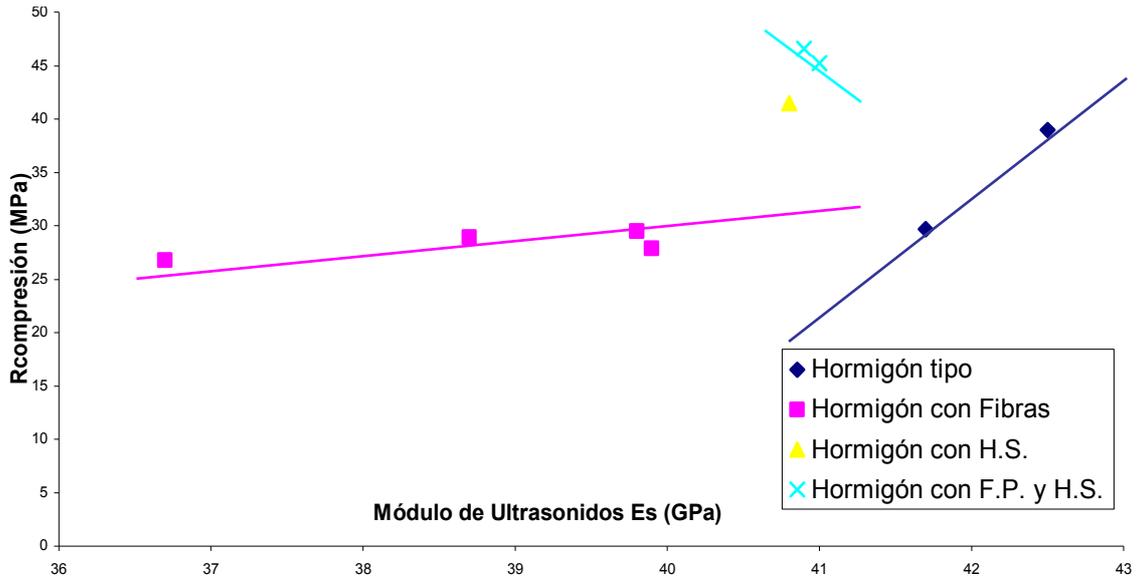


Fig. 4.02. Gráfica de relación entre las resistencias a compresión y el módulo de ultrasonidos Es.

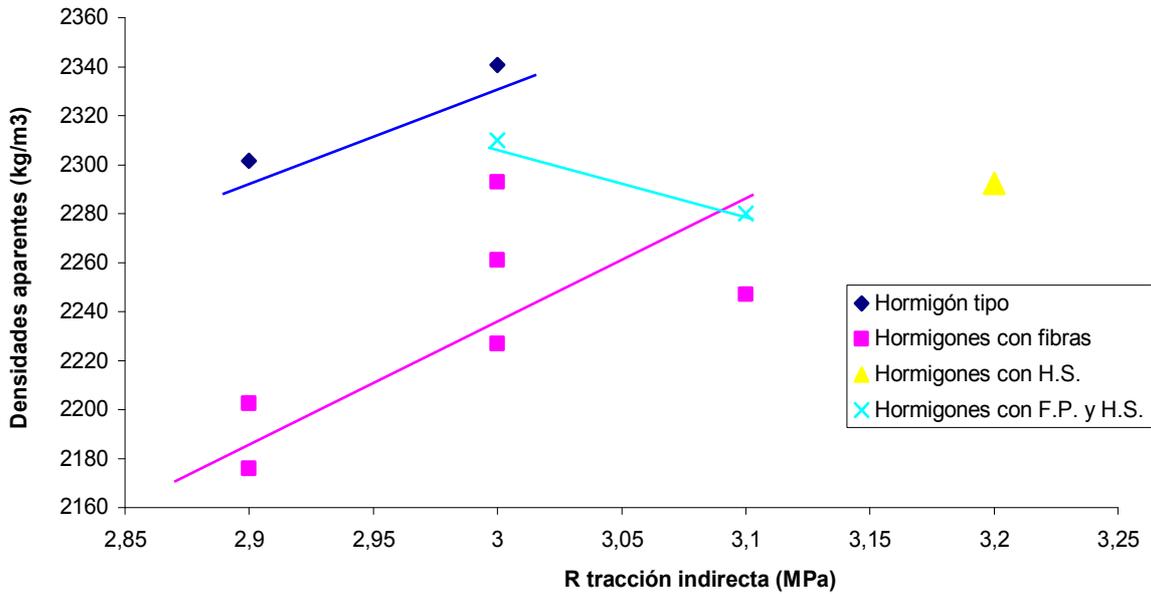


Fig. 4.03. Gráfica de relación entre la resistencia a tracción obtenidas mediante ensayo a brasileño y la densidad de las distintas series con distintas adiciones.

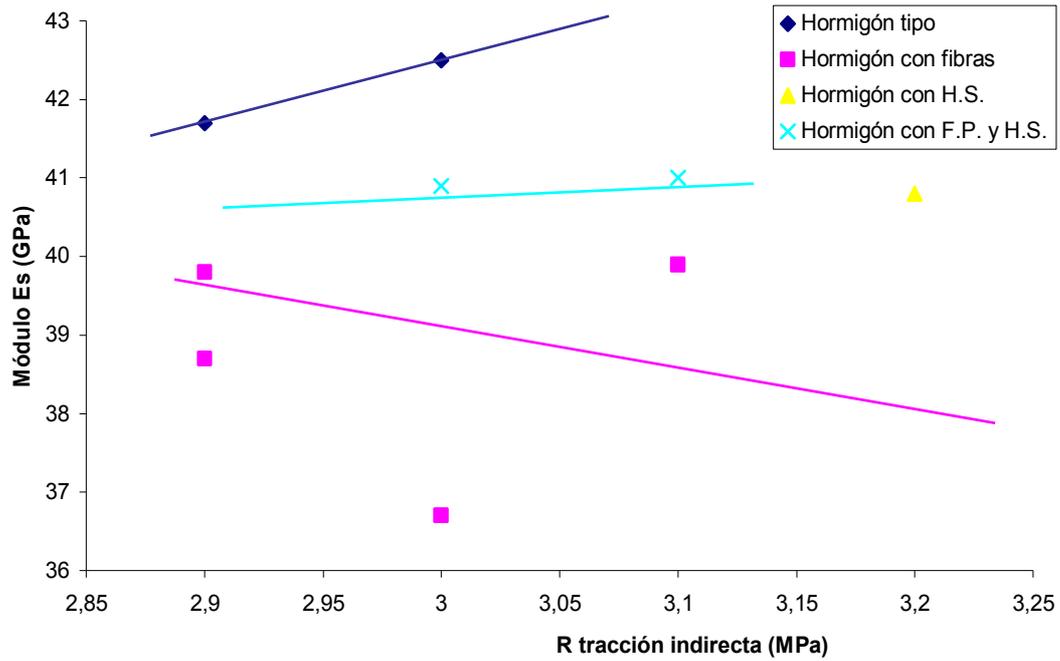


Fig. 4.04. Gráfica de relación entre las resistencias a tracción obtenidas mediante ensayo a brasileño y el módulo de ultrasonidos ( $E_s$ ).

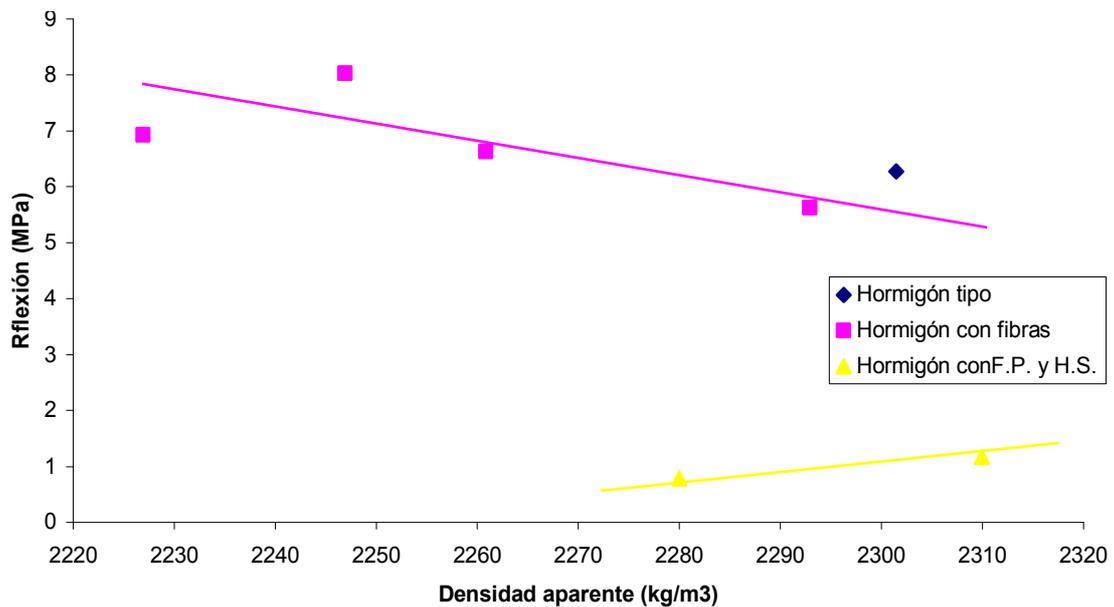


Fig. 4.05. Gráfica de relación entre la resistencia a flexión obtenida mediante ensayo de probetas prismáticas biarticuladas y la densidad de las distintas series con distintas adiciones.

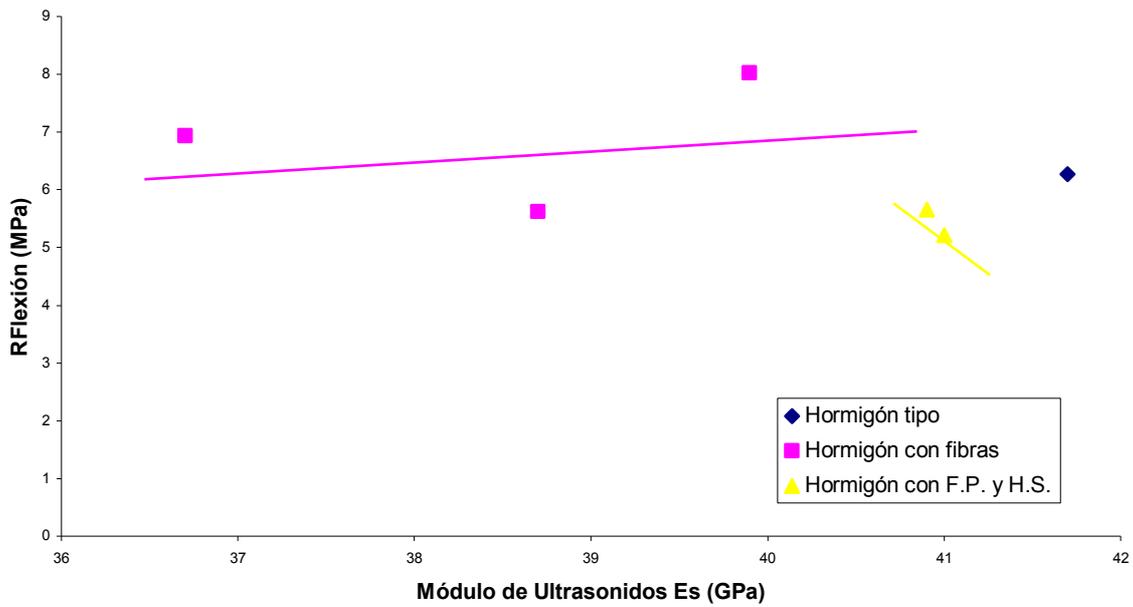


Fig. 4.06. Gráfica de relación entre la resistencia a flexión obtenida mediante ensayo en probeta prismática biarticulada con carga única centrada y el módulo de ultrasonidos (Es).

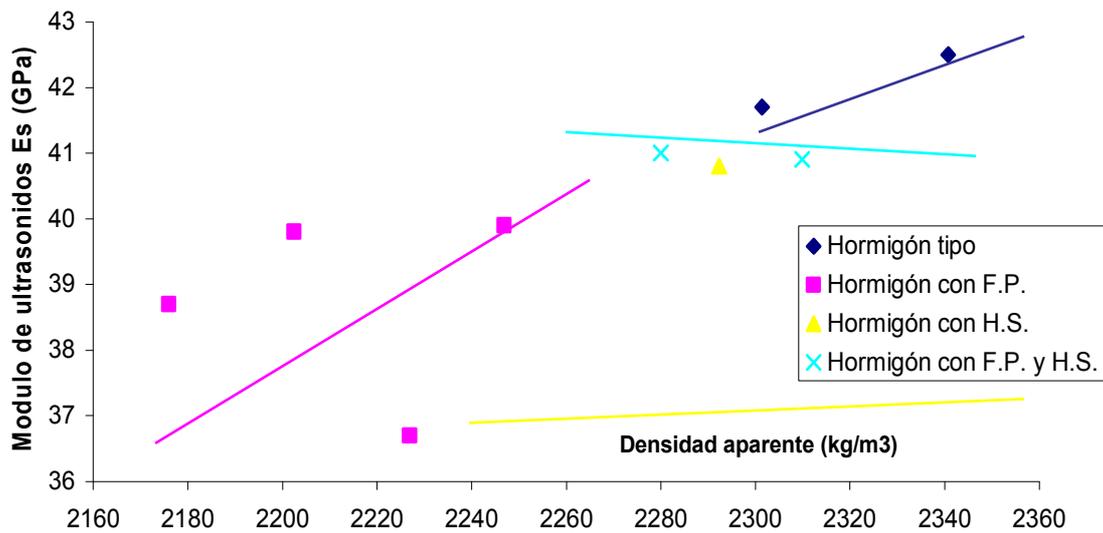


Fig. 4.07. Gráfica de relación entre la densidad aparente y el módulo de ultrasonidos en distintas series de hormigones avanzados.

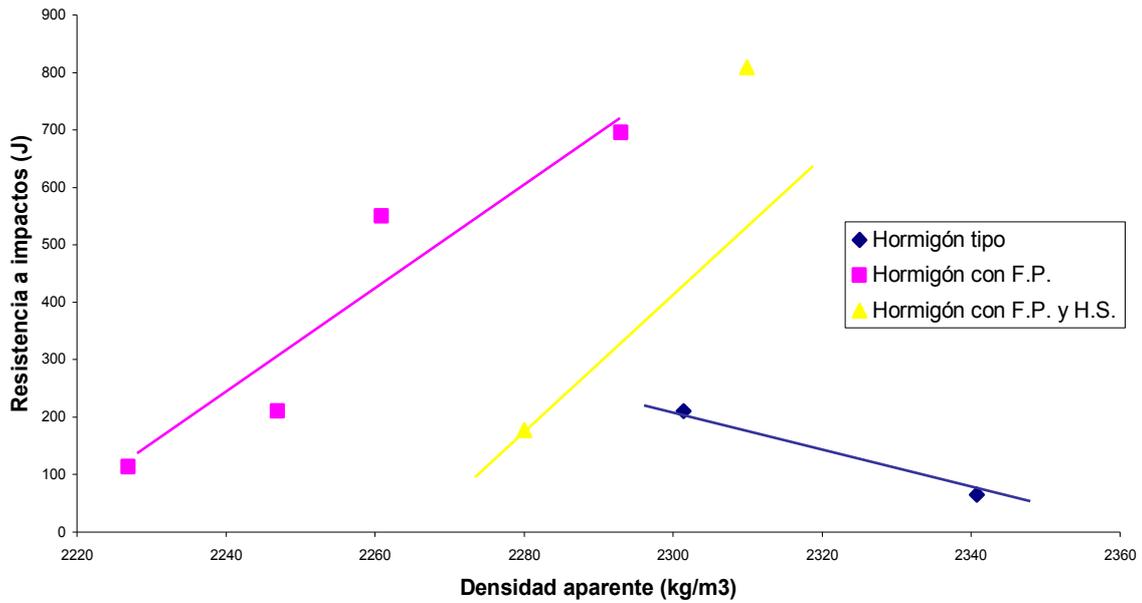


Fig. 4.08. Gráfica de relación entre densidad aparente y resistencia a impactos resistidos por las distintas series de hormigón avanzado.

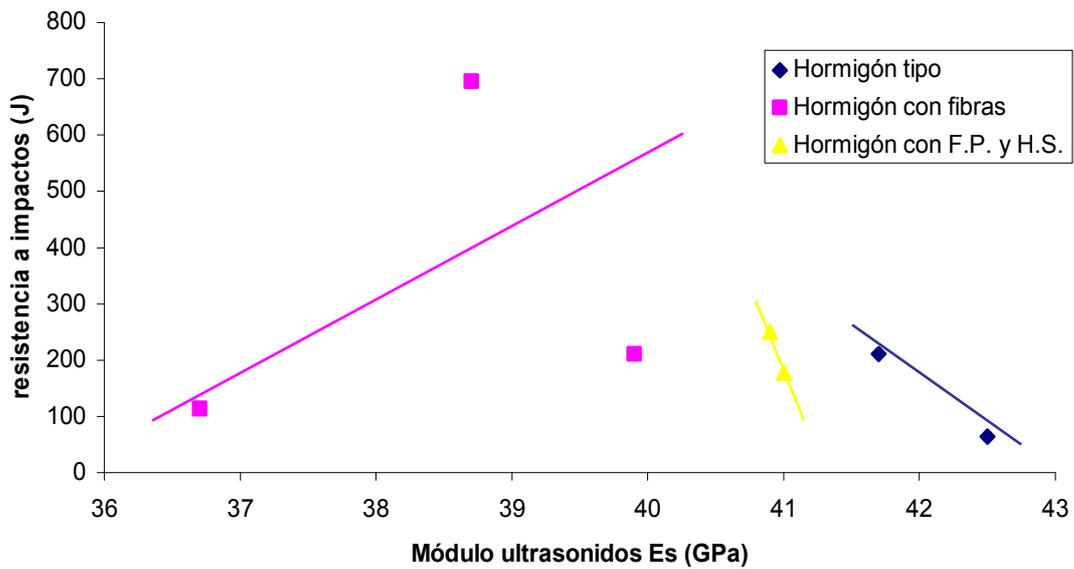


Fig. 4.09. Gráfica de relación entre módulo ultrasonidos y resistencia a impactos.

En general podemos apreciar una relación entre varios parámetros en línea con lo preestablecido en el estado del arte.

En general la densidad aparente en los hormigones está directamente relacionada con las resistencias mecánicas. En concreto se puede apreciar que este parámetro es más determinante en los hormigones sin adiciones que en los hormigones con fibras, aunque en éstos últimos también se mantiene la relación entre ambos. A flexión en general se produce también una relación directa, excepto en aquellas series con fibras cortas de polipropileno, en las que la resistencia responde más a la proporción de ésta en las dosificaciones. Las resistencias a impacto mejoran con el aumento de la densidad en las series con fibras y con humo de sílice, no siendo así en las de hormigones sin adiciones

El módulo de ultrasonidos está relacionado también con las resistencias mecánicas, especialmente en las resistencias a compresión en todas las series. A tracción el comportamiento es indiferente, incluso inverso en los hormigones con microfibras, debido seguramente a que la colaboración de la fibra es más determinante. Las tensiones absorbidas a flexión y el módulo elástico poseen cierta proporcionalidad en los hormigones con fibras y valores inversos en los hormigones con combinaciones de humo de sílice y fibra. La resistencia a impacto es indiferente al módulo de ultrasonidos, con valores variables en cada serie de hormigón ensayada, aunque existe una tendencia al aumento de las resistencias con el módulo en las que poseen fibras y no así en el resto de las series.

En lo referente a la relación del módulo de ultrasonidos  $E_s$  y las densidades aparentes esta es proporcional con aumento conjunto de las mismas en todas las series ensayadas.

La relación del módulo elástico  $E$  y las densidades no se corresponden de igual manera, siendo directamente proporcional en las series que combinan humo de sílice y fibras de polipropileno e inversamente proporcional en aquellas sólo con fibras.

#### 4.1.2. Relación entre fisuración y los parámetros estudiados.

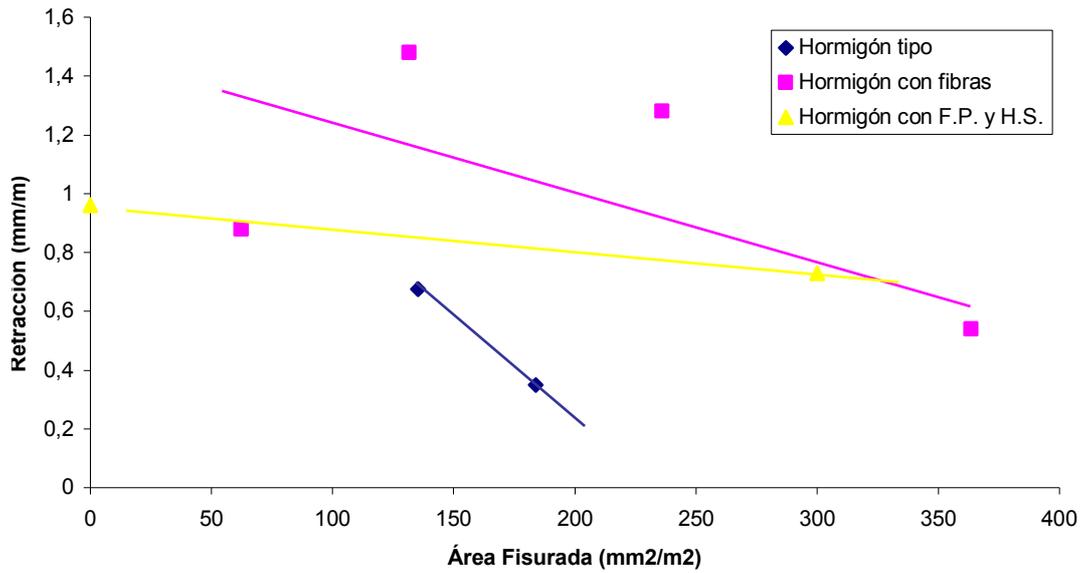


Fig. 4.10. Gráfica de relación entre retracción y área fisurada en los distintos tipos de hormigón avanzado.

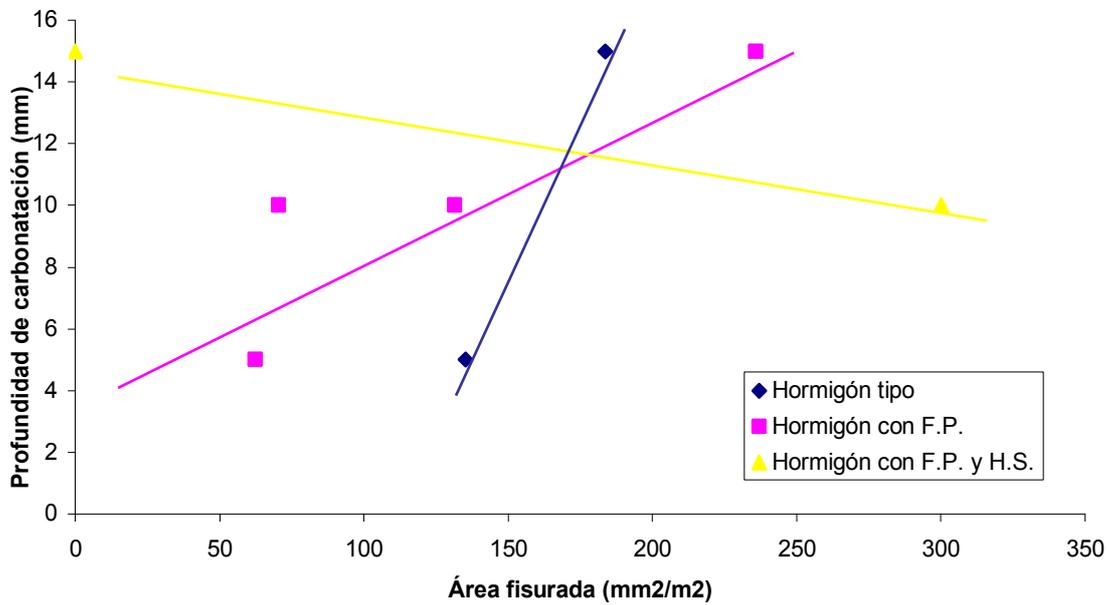


Fig.4.11. Gráfica de relación entre profundidad de carbonatación y el área fisurada en las distintas series de hormigón avanzado.

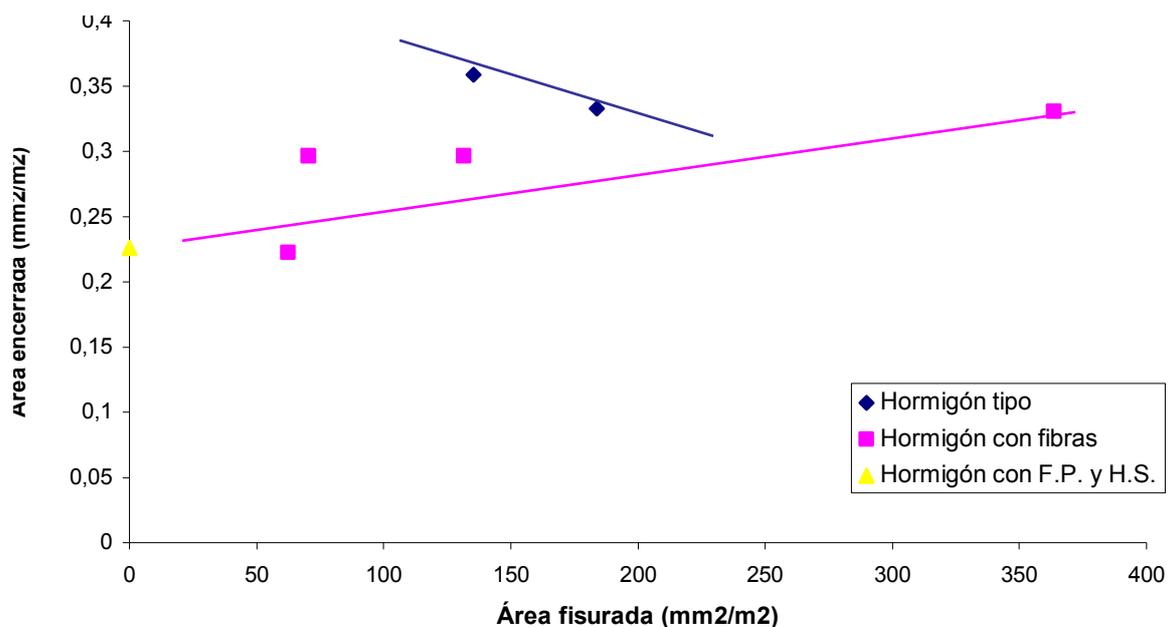


Fig. 4.12. Gráfica de relación entre área fisurada y el área encerrada en los ensayos de penetración de agua a presión.

En la figura inicial se aprecia que la relación entre retracción y área fisurada es más estrecha en las series sin fibras, y en menor medida en aquellos con fibras debido a la colaboración posterior de éstas a fisuración. En las series en las que se ha combinado la microfibras de polipropileno y el humo de sílice la relación es menor, debido a que como se analizó anteriormente se mejora la estabilidad del conjunto.

En lo referente a la relación entre profundidad de carbonatación y área fisurada es determinante en el avance de este ataque químico. La relación es directamente proporcional en los hormigones que no poseen humo de sílice, tanto con o sin fibras. La inclusión de humo de sílice ha producido un mayor efecto en la carbonatación al disminuir la cantidad de reservas de hidróxido de calcio en la sustitución de este material por cemento.

La permeabilidad, estudiada con ensayos de agua a presión, y el área fisurada se relacionan entre sí en aquellos hormigones que poseen fibras, es decir con un área fisurada mayor la permeabilidad del hormigón es mayor. En los hormigones con fibra se ha conseguido controlar la permeabilidad a la vez que la fisuración. En los hormigones sin fibras la relación entre estos parámetros es inversa, debido a que las caras de las

probetas de estas series poseían discontinuidades y variaciones de densidad. En cambio en los hormigones con fibras se produce una bajada de densidad que hace más dependiente al hormigón en la calidad de sus caras externas.

4.1.3. Relación entre carbonatación y compacidad y permeabilidad de materiales.

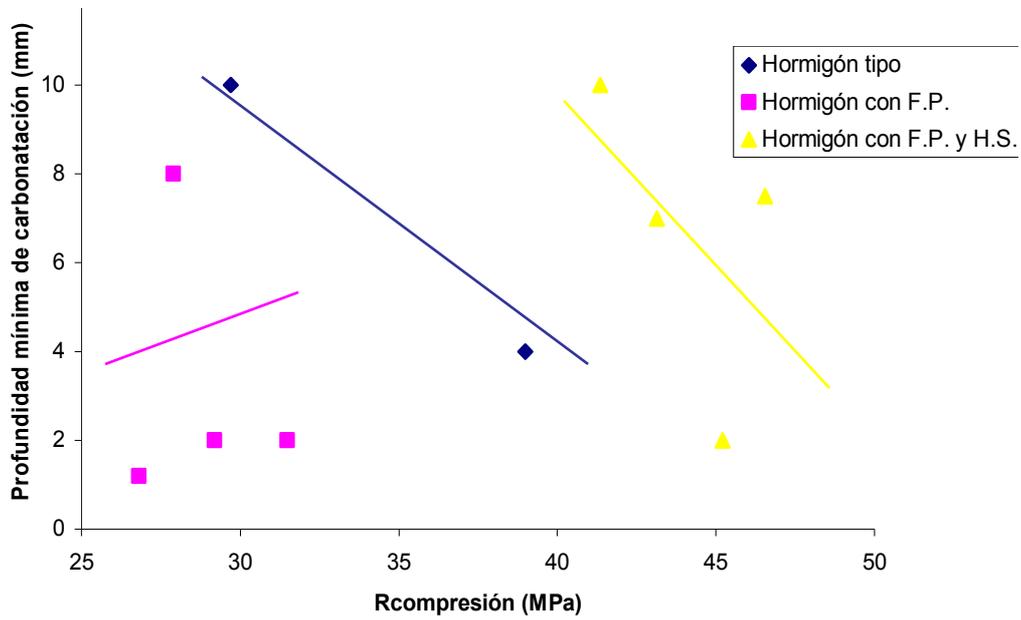


Fig. 4.13 Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y resistencias a compresión.

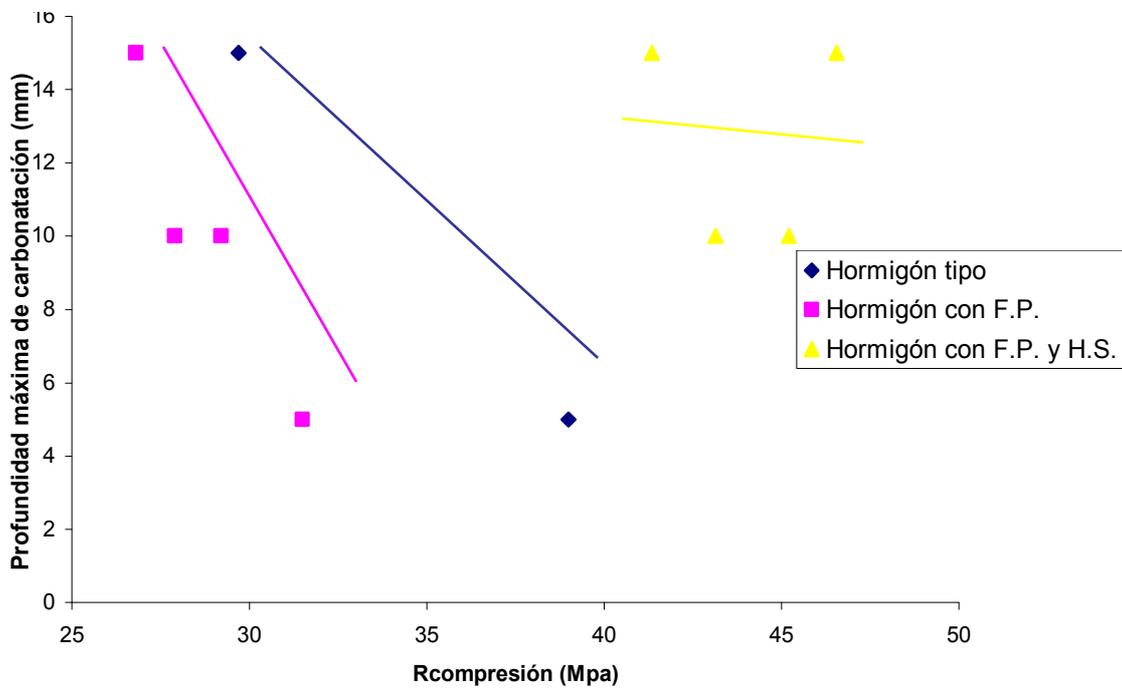


Fig. 4.14. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y resistencias a compresión.

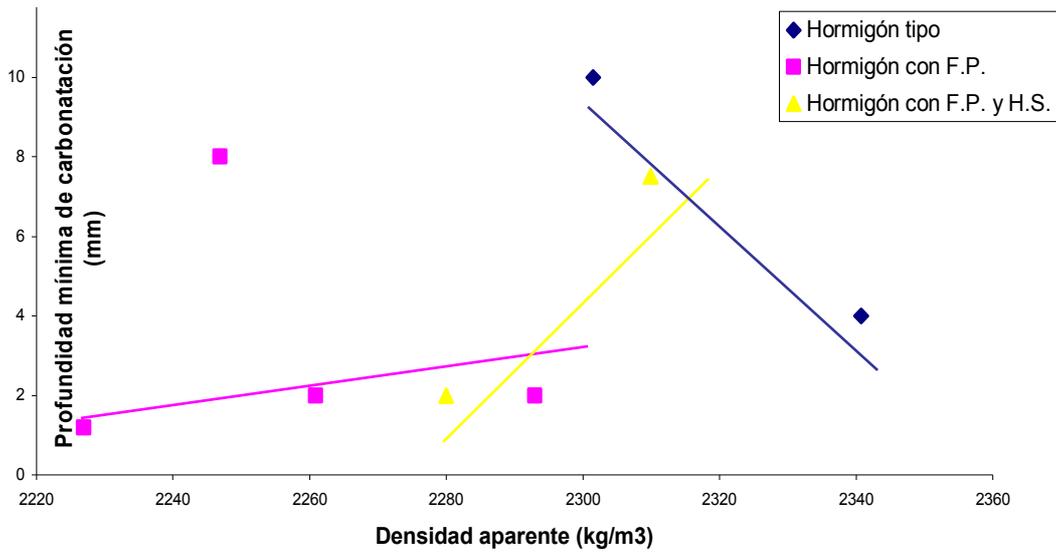


Fig. 4.15. Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y la densidad aparente.

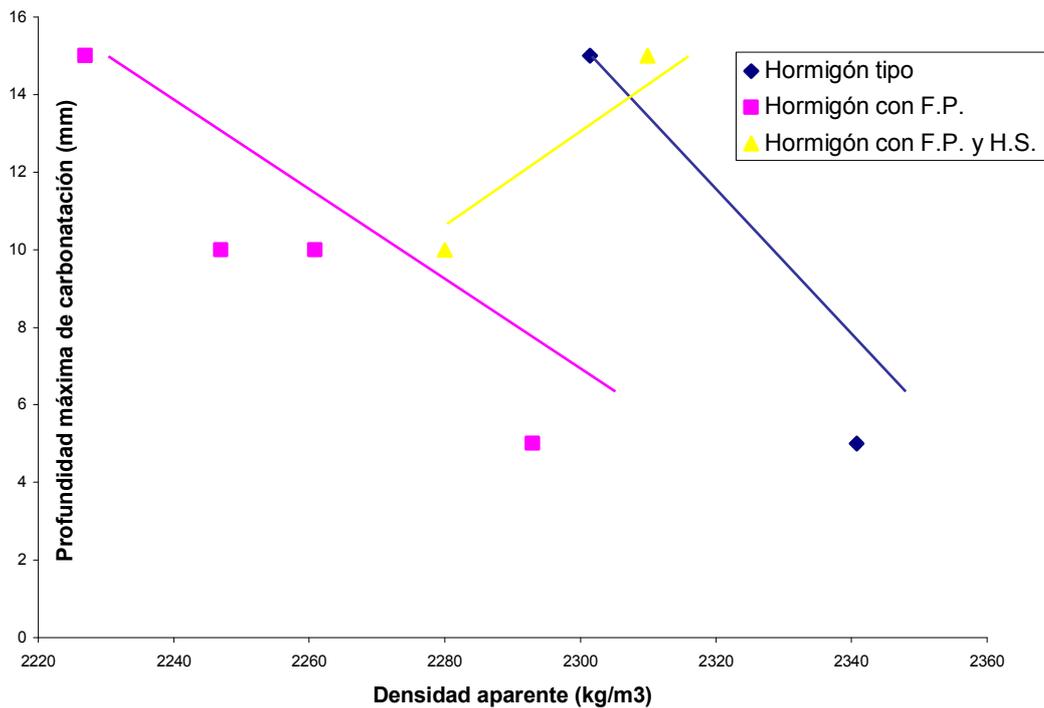


Fig. 4.16. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y la densidad aparente de las distintas series de hormigón avanzado.

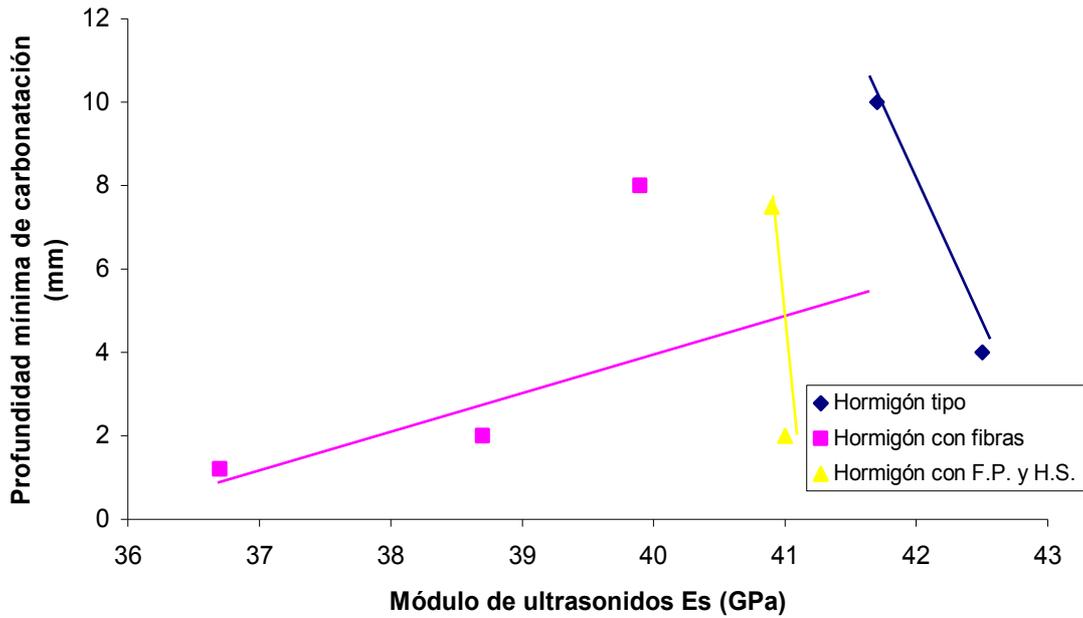


Fig. 4.17. Gráfica de relación entre profundidad mínima de carbonatación pasados dos años y módulo de ultrasonidos de las distintas series de hormigón avanzado.

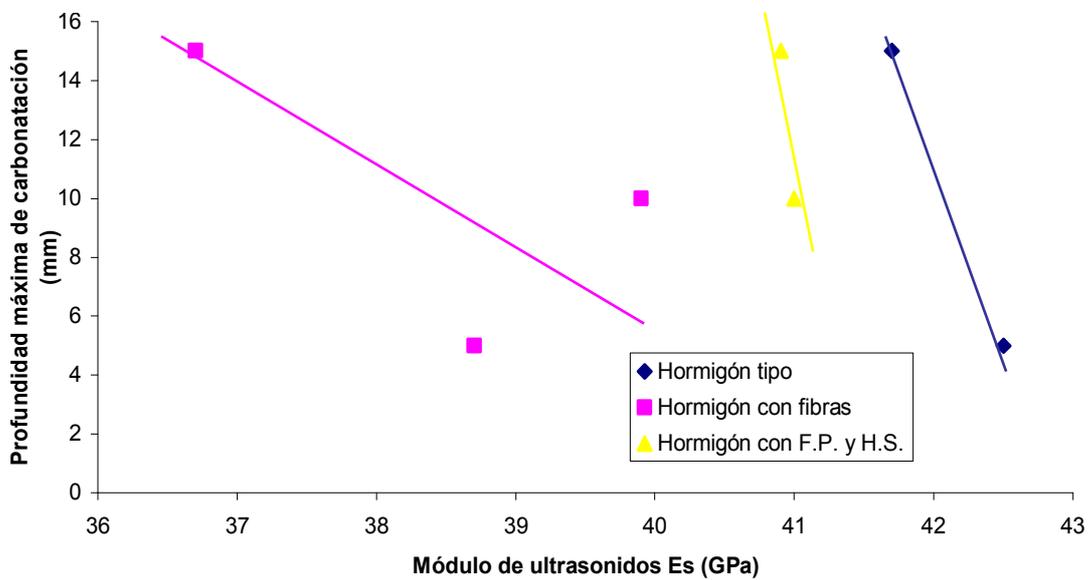


Fig. 4.18. Gráfica de relación entre profundidad máxima de carbonatación pasados dos años y el módulo de ultrasonidos de las distintas series de hormigón avanzado.

La carbonatación en los hormigones ensayados se ha comportado de manera diversa en cada caso.

En la gráfica de relación entre resistencia a compresión y carbonatación podemos ver una tendencia a la disminución de las profundidades mínimas y máximas de entrada de CO<sub>2</sub> en el hormigón con el aumento de las resistencias de los mismos. Se ha comprobado que la tendencia marcada por la normativa de aumentar la clase resistente de un hormigón en ambientes con mayor exposición a ataques químicos es adecuada en nuestros hormigones.

La densidad aparente de un hormigón nos indica su compacidad y la cantidad de poros que puede poseer, por lo que sería lógico pensar que ha mayor densidad más dificultad tendría un agente externo para penetrar a través de la masa del mismo. En los ensayos realizados hemos visto que esta relación se produce sólo en los hormigones sin adición y en menor medida en aquellos con microfibra. En los hormigones con humo de sílice se produce un efecto contrario, seguramente por los problemas de segregación de la masa que puede haber producido discontinuidades y puntos de acceso para el CO<sub>2</sub>, a la vez que químicamente contiene menos cantidad de reservas de hidróxido de calcio al sustituir cemento por este material.

El módulo de ultrasonidos nos puede indicar el comportamiento del hormigón ante la carbonatación, pues como vimos en artículos anteriores mediante ultrasonidos podemos llegar a encontrar discontinuidades en la masa de éstos. Este factor no sucede sólo en las series con fibras, debido a que el aumento de fibras mejora las resistencias de las capas externas al evitar la fisuración pero disminuye la densidad con el aumento de la adición de fibra.

## 4.2. Conclusiones finales.

Podemos concluir con el resumen de los efectos que las distintas variantes que hemos aplicado a los hormigones producen en estos.

### 4.2.1. Reducción de agua.

La reducción de agua produce una pérdida de trabajabilidad en el hormigón, haciendo necesario el empleo de superplastificantes, que influyen en la morfología de la pasta del cemento al incluirle burbujas de aire como hemos visto en las imágenes expuestas de microscopio, en concordancia con Fernández Cánovas (4).

En lo referente a las resistencias mecánicas podemos observar mejoras con la reducción de la relación a/c, especialmente a compresión tanto con fibras como con humo de sílice.

En el aspecto de la retracción, la disminución en la relación a/c en la masa del hormigón reduce la retracción en aquellos que poseen superplastificante en su dosificación, tanto en los hormigones sin adiciones, como ya se ha estudiado (4 y 7), como con humo de sílice y con fibras. Este aspecto como hemos visto anteriormente se refleja en los valores de fisuración posteriores con mejora de los resultados.

La reducción de la relación a/c produjo efectos positivos en los ensayos realizados de fisuración, disminuyendo el área fisurada y la longitud máxima y total fisurada en las losas ensayadas en condiciones de viento. Las series con relación a/c inferior a 0,5 en hormigones con 0,066% de volumen de fibra obtuvieron mejoras definitivas en el hormigón, con áreas fisuradas nulas en los ensayos realizados con losas Kraai con viento.

La reducción de la relación a/c afectó negativamente en algunas series ensayadas a profundidad de carbonatación, debido a problemas seguramente de segregación y a que estos ensayos fueron realizados en hormigones con humo de sílice, con menores reservas de hidróxido de calcio como hemos visto anteriormente.

Otro aspecto en que se beneficia el hormigón por los valores bajos de a/c es la compactación, ya que la densidad aparente aumenta con la disminución de agua, así como

también mejora el módulo de ultrasonidos. Se consigue también una menor permeabilidad al agua en los ensayos de agua a presión presentados.

Podemos por tanto, a tenor de los resultados, establecer valores óptimos de relación a/c por debajo de 0,5 en aquellos casos que consigamos buena trabajabilidad con el empleo de superplastificantes.

#### 4.2.2. Fibra corta de polipropileno.

En general el empleo de fibra de polipropileno de 19 mm de longitud ha sido beneficioso, incluso mejorando aspectos para los que no fue pensada o establecida en las referencias estudiadas sobre éstas. La fibra de polipropileno ha variado notablemente la consistencia y trabajabilidad de la masa con necesidad de aumento de la cantidad de superplastificante.

No ha afectado a las propiedades mecánicas. En compresión los valores se han mantenido estables, al igual que a tracción. La resistencia a flexión ha mejorado levemente por la inclusión de fibra debido a que en las zonas a tracción pueden colaborar débilmente. En el aspecto que mejor han funcionado mecánicamente es en el de resistencia a impacto, especialmente en combinaciones con Humo de Sílice, con proporciones entre 0,066-0,099 % con aumento de los valores de hasta un 100%. Estos valores están en línea con los obtenidos con fibras de acero por Nataraja (24) y por Balaguru y Shah (17) en hormigones con fibras de polipropileno.

La fibra ha desempeñado su mejor labor en el control de las fisuras provocadas en las primeras horas de curado por la retracción por secado. Este aspecto ha sido espacialmente visible en los hormigones con humo de sílice, que poseen mayores retracciones y por lo tanto mayores tensiones tempranas del hormigón en su deformación. Los parámetros estudiados en este campo han sido el área fisurada, la fisura máxima y la fisuración total, tomando como porcentaje óptimo el de 0,066%, en consonancia con lo estudiado por Barluenga y Hernández-Olivares (19).

Se redujo también, aunque ligeramente la profundidad de carbonatación máxima y mínima en los hormigones con fibras. El valor que se mantiene como óptimo es el de 0,066%.

No obstante la fibra afecta negativamente la retracción en el hormigón, como hemos visto en este apartado, pudiendo deberse a la mayor cantidad de superplastificante. La retracción aumenta hasta un valor de 0,099% de porcentaje en peso de fibra y disminuye una vez aumentado este valor.

La adición de microfibra perjudica los valores de compacidad estudiados, tanto a la densidad aparente como a los módulos de ultrasonidos. Esto se puede deber a que la fibra posee una densidad menor que otras fibras como las de acero, donde su efecto no es tan notable, y a que la disminución en la docilidad que producen puede producir segregación.

Se consigue mejorar la impermeabilidad al agua a presión, con valores de profundidad del frente de penetración de agua menores en cantidades de fibra también de 0,066%.

En general podemos concretar un volumen de fibra a adicionar a los hormigones de 0,066% como óptimo, coincidiendo con otros autores, con mejoras en la permeabilidad a líquidos y gases.

#### 4.2.3. Humo de sílice o microsílíce.

La adición de humo de sílice en las mejoras mecánicas fue relevante especialmente en las resistencias a compresión como era previsible (4 y 7). En lo referente a las probetas estudiadas a flexión e impacto su empleo debe de ser controlado mediante la fibra, debido a que las retracciones y las fisuraciones eran tan fuertes que dejaban puntos débiles en la probeta de posterior rotura. En los casos en los que se combinaba ambas adiciones se mejoraba los resultados notablemente con el humo de sílice una vez controlada la fisuración.

El empleo de la adición de microsílíce en sustitución de cemento ha sido negativo tanto en la retracción como en la fisuración, con aumentos prácticamente

exponenciales por su uso. No obstante existía cierta sinergia con el empleo de fibras y reducción de agua, consiguiendo los mejores resultados a fisuración de esta manera.

El humo de sílice también perjudicó los valores de profundidad a carbonatación máximos y mínimos, debido a la diferencia de composición química de las series en las que era empleado. La adición de este material reduce las reservas de hidróxido de calcio (9) en los hormigones y por tanto el pH de los mismos disminuye con mayor celeridad en el tiempo.

Se produjeron mejoras de la compacidad, tanto en las densidades aparentes como en módulo de ultrasonidos. En cambio su efecto en la permeabilidad, en los ensayos con agua a presión fue negativo, permitiendo avances mayores del líquido en su interior. En este aspecto los resultados obtenidos con esta adición son contrarios a los esperados, pues se empleó para rellenar los huecos dejados entre los granos de cemento de mayor tamaño que el microsílíce y mejorar la compacidad, pensando en que de esta manera se disminuiría la permeabilidad.

#### **4.3. Hormigones avanzados en ambientes agresivos químicamente.**

El principal objetivo de esta tesis doctoral era estudiar varios de los factores que afectan la durabilidad de los hormigones químicamente para controlarlos con adiciones que mejoraran individual o colectivamente estos aspectos, aumentar la vida útil del material y reducir los costes futuros de mantenimiento en las estructuras y elementos constructivos en los que se emplea.

El ambiente en el que se emplean los hormigones es un factor importante en la vida del material. Se trata como hemos visto de un elemento poroso con alta permeabilidad a agentes externos.

Normalmente el desarrollo de los hormigones va centrado a la mejora de las capacidades resistentes, manteniendo normalmente las dosificaciones para cada resistencia independientemente del lugar. Cuando un ambiente es más agresivo se soluciona de manera simple aumentando la cantidad de material que recubre al acero que dota al hormigón de resistencia a tracción (1).

Como se ha visto mediante cambios en la dosificación o con adiciones en los hormigones podemos mejorar la capacidad de adaptarse al medio en el que se encuentra la pieza proyectada.

Las líneas seguidas por la normativa para mejorar la resistencia de los hormigones ante ataques químicos pueden ser discutidas para los distintos tipos de cemento y adiciones en cada serie de hormigones estudiados en este trabajo. Lo que en primer lugar se puede desprender de los ensayos realizados es que cada hormigón es distinto a otro variando ligeramente uno de los parámetros existentes durante su fabricación, vertido y curado.

Los ensayos realizados son difícilmente viables en toda obra, pero al igual que se realizan estudios de resistencia a compresión como mínimo, también se podría estudiar aspectos como la compacidad de las probetas y la penetración a agua utilizando la misma probeta.

Los materiales adicionados a los hormigones canarios estudiados han mejorado, en general, las capacidades resistentes químicas de los hormigones, lo que nos permitiría disminuir recubrimientos o mantener las capacidades resistentes de los hormigones para ambientes más desfavorables. También se ha comprobado que es prácticamente igual de importante el cuidado del hormigón durante su curado.

Aspectos como la retracción pueden aumentar hasta en tres veces con el efecto del viento o del aumento de las temperaturas, existiendo dosificaciones que son menos dependientes que otras antes estos parámetros ambientales.

Se debe establecer en cada ambiente una serie de parámetros a resistir por el hormigón, tales como la penetración anual de la carbonatación, la permeabilidad o la resistividad de un hormigón (16), como también hemos visto en otros trabajos que marcan líneas de estudio en cuanto a la durabilidad. De esta manera una casa de hormigones podría acreditar la resistencia química de un hormigón en un ambiente o ante una determinada situación de hormigonado.

Para ambientes desfavorables químicamente se puede establecer que el empleo de la fibra de polipropileno es beneficioso por la disminución en primer lugar de la fisuración, con menores puntos de entrada de agentes externos, en segundo lugar por la

disminución de la permeabilidad a agua a presión y en último lugar por el aumento de resistencias ante el ataque de CO<sub>2</sub> del ambiente, manteniendo el pH del hormigón en el tiempo. Se puede establecer un porcentaje en peso de fibra de un 0,066 % como óptimo en el empleo de las microfibras manteniendo la trabajabilidad del hormigón con superplastificantes.

Con la reducción de agua podemos conseguir también hormigones más resistentes al ataque de elementos agresivos químicamente, controlando la compacidad y la retracción para una disminución de la fisuración.

En este ámbito de estudio químico podemos desaconsejar el empleo de humo de sílice sin la colaboración de la fibra, debido al aumento de la retracción y de la fisuración, así como la pérdida de docilidad del hormigón en estado fresco, que requiere mayores cantidades agua que serían muy negativas o de superplastificante para mantener la relación a/c.

#### **4.4. Resistencias mecánicas de hormigones avanzados.**

Otro de los objetivos de esta tesis, era el control de las capacidades mecánicas de los hormigones mejorados químicamente, y estudiando en qué aspecto podían mejorar como efecto añadido o secundario la resistencia de los hormigones ante sollicitaciones físicas externas.

En general las adiciones empleadas no afectan negativamente ningún aspecto mecánico del hormigón. La resistencia a compresión de los hormigones se mejoró con la reducción de agua y con la incorporación de microsílice, siendo más efectiva la reducción de agua. A tracción se mejoran las capacidades resistentes del hormigón con el empleo de la microfibra de polipropileno y con el humo de sílice, mientras que a flexión la fibra mejoró débilmente las resistencias en porcentajes óptimos de un 0,1% de peso.

La resistencia a impacto de los hormigones avanzados mejora con la adición fibra de polipropileno de 19 mm de longitud, especialmente en combinación con el humo de sílice, con resistencias hasta tres veces superiores que en los hormigones tradicionales canarios.

# CAPÍTULO 5

## APLICACIONES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS CANARIOS AVANZADOS Y FUTURAS INVESTIGACIONES

### 5.1 Ejemplo constructivo.

El deseo de esta investigación es la aplicación final de estos avances en materiales constructivos reales, en los que hemos visto los problemas que se han resuelto en esta tesis doctoral.

Es por ello que ha continuación se recogen dos ejemplos de los muchos en los que se podrían emplear estos avances. Por un lado en elementos esbeltos o de gran superficie, como las losas empleadas en pavimentos, albardillas, aplacados..., por otro lado, elementos de prefabricación o con moldes deslizantes, como las barreras de autopista.

En los elementos esbeltos, por lo general, es difícil conseguir recubrimientos de las barras de acero que los refuerzan con el exterior, hasta tal punto que pueden obligar que estos se realicen sin éstas. Según los datos obtenidos en esta tesis doctoral podemos conseguir reducir los recubrimientos manteniendo la vida útil del material, asegurando la no entrada de agentes externos nocivos y el mantenimiento del pH. Por otro lado se puede emplear estos hormigones avanzados sin armadura interior en elementos superficiales como pavimentos industriales, manteniendo la estética al ser materiales que no fisuran y por otro lado con resistencias a flexión buenas y resistencias a impacto mejores que en los hormigones sin estas adiciones.

En las barreras de autopista los hormigones realizados con moldes deslizantes se requieren hormigones con consistencias secas o plásticas, que no pierdan su forma al trasladarse el encofrado, como los hormigones avanzados estudiados con humo de sílice y fibras de polipropileno de 19 mm. Por otro lado la durabilidad de estos hormigones es deseable para disminuir los costes de mantenimiento de las mismas. Posee además estos hormigones mejores resistencias a impacto, y según lo estudiados por otros autores (4, 34) lo tendría también al desgaste.

## 5.1 Futuras investigaciones.

El empleo de adiciones en los hormigones canarios se ha ido realizando siguiendo quizá la estela de estudios internacionales en la mejora de aspectos específicos para cada adición.

En esta tesis se ha intentado dejar claro que es a veces en la actuación conjunta de materiales donde radica el éxito final. La sinergia de materiales de igual o distinta índole puede ser un camino de investigación amplio por estudiar.

Una línea abierta de investigación es el del empleo de fibras en hormigones canarios distintas a las de polipropileno, pues al modificar el tamaño, la densidad o la flexibilidad de la fibra, los resultados serán distintos. O el empleo conjunto de fibras del mismo material con distintos tamaños en una misma dosificación, para evitar emplear en materiales esbeltos el acero, mejorando las condiciones mecánicas en mayor medida con las fibras de mayor tamaño y las químicas con las de menor tamaño, así como la fisuración superficial de la pieza.

En cuanto a la durabilidad se podría estudiar la resistencia de estos hormigones a abrasión, a altas temperaturas y fuego, tanto con fibras como con microsílíce y la combinación de ambos. Otro aspecto a estudiar sería la penetración de cloruros en hormigones mediante ensayos acelerados en cámara salina o mediante ciclos de humectación y desecación con agua con cloruros o mediante inmersión de probetas en estas soluciones.

Se puede mediante modelos matemáticos predecir y establecer la profundidad de entrada de agentes externos como el  $\text{CO}_2$  o los cloruros en los hormigones avanzados, con leyes como la de Fick estudiadas anteriormente. De esta manera se podrían establecer recubrimientos y la vida útil de un hormigón desde el proyecto.

Otra serie de adiciones que tienen cabida en esta serie de estudios posteriores son los agentes con capacidad de expansión empleados en el control de la retracción de los hormigones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. **Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)**, Ministerio de Fomento, Real Decreto 1429/2008.
2. Schmincke, H.U., “**Geological Field Guide of Gran Canaria**”, sexta edición, Pluto Press, Kiel, Germany.
3. I. Menéndez, J.L. Díaz Hernández, J. Mangas, I. Alonso, P.J. Sánchez-Soto, “**Airbone dust accumulation and soil development in the North-East sector of Gran Canaria**” (Canary Islands, Spain), (Journal of arid environments, 71 (2007), 57-81).
4. M. Fernández Cánovas, “**Hormigón**”, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Quinta edición, 1999).
5. C. Guigou, “**Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones**”. Tesis doctoral, 1990.
6. **Instrucción para la recepción de cementos. (RC-08)**, Real Decreto 956/2008.
7. David K. Doran, “**Construction Materials Referente Book**”, Butterworth Heinemann (1992).
8. Taylor HFW. “**Studies on the chemistry and microstructure of cement pastes**”, (Proc Brit Ceram Soc nº 35 (1984), 65-82).
9. R. Talero, “**Comparative XRD analysis ettringite originating from pozzolan and Portland cement**”, (Cement and concrete research, 26 (1996), 1277-1283).
10. R.E. Rodríguez-Camacho, “**Importance of using the natural pozzolans on concrete durability**”, (Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1851-1858).

11. B. Erick Barragán, A. Pacios Álvarez, P. Serna Ros, “**Primer Congreso español sobre hormigón autocompactante**” (HAC2008), Valencia, (2008).
12. R. Santana Rodríguez, “**Características y propiedades de los hormigones autocompactables y su aplicación en Canarias**”. (I Curso de Tecnología del hormigón en la edificación y la obra pública (2004), IECA Canarias. Las Palmas de Gran Canaria).
13. Gonzalo Melián Marrero, “**Aplicaciones constructivas de materiales canarios avanzados de matriz cementicia reforzados con fibras**”. Tesis doctoral. 2006.
14. J.M. Pérez Luzardo, “**Color y Textura en el hormigón estructural**”, Intemac, nº4 (1991).
15. C. Oyarzabal, “**Fisuración del hormigón. Causas, diagnóstico y control**”. Financiera y Minera. Intalcementi Group.
16. G.R. Meira, “**Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone-Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete**”, (Cement and Concrete Composites, nº29 (2007), 667-676).
17. Perumalsamy N. Balaguru, Surendra P. Shah, “**Fiber reinforced cement composites**”, McGraw-Hill (1992).
18. “**Ficha técnica comercial Grace “Grace Microfiber”**”, casa comercial Grace (2006).
19. G. Barluenga, F. Hernández Olivares, “**Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC**”, (Cement and Concrete Research, 37 (2007) 1624-1638).

20. Francesca Ceroni, “**Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members**”, (Cement and Concrete Composites, 28 (2006) 857-868).
21. Y. Xu, “**Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 2009-2016).
22. W.P.S. Dias, “**Mechanical Properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C**”, (ACI Master, J. 87 (2) (1990), 160-166).
23. T.S. Nagaraj, “**Relative efficacies of different concrete mix proportioning methods**”, (Journal of Structural Engineering, 26 (1999), 107-112).
24. M.C. Nataraja, “**Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance**”, (Cement and Concrete Research, n° 35 (2005), 2350-2359).
25. F. Puertas, “**Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres**”, (Cement and Concrete Research, n° 33 (2003), 2031-2036).
26. Sobhy Masoud, “**Evaluation of corrosion in FRP repaired RC beams**”, (Cement and Concrete Composites, n° 28 (2006), 969-977).
27. N. Banthia, “**Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization**”, (Cement and Concrete Research, n° 37, (2007), 1366-1372).
28. F. Hernández-Olivares, “**Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements**”, (Construction and Building Materials, n° 21 (2007), 1918-1927).
29. “**Ficha técnica comercial Grace “Grace Force 10,000 D”**”, casa comercial Grace (2006).

30. Anne-Mieke Poppe, “**Cement hydration in the presence of high filler contents**”, (Cement and Concrete Research, n° 35 (2005), pp. 2290-2299).
31. Serge Quellet, “**Microstructural evolution of cement paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test result**”, (Cement and Concrete Research, n° 37(2007), 1654-1665).
32. G.V. Guinea, “**The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete**”, (Cement and Concrete Research, n° 32 (2002), 1961-1970).
33. C. Suesta, M.J.L. Tendero; I. Beleña, “**Activación alcalina de humo de sílice en morteros de cemento: estudio de resistencias mecánicas**”, VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía (2002), 739-747.
34. “**Ficha técnica comercial Grace “Grace Fly Ash”**”, casa comercial Grace (2006).
35. Somsak Swaddiwudhipong, “**Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 2077-2084).
36. Haluk Aktan, Upull Attanayaka, “**Causes and cures for cracking of concrete barriers**”, (Department of civil and Environmental Engineering, MDOT (Michigan DOT Centre of Excellence), Michigan (2004)).
37. T. Vidal, “**Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment**”, (Cement and Concrete Research, 37 (2007), 1551-1561).
38. M. Sule, “**The effect of reinforcement on early-age cracking due to autogenous shrinkage and thermal effects**”, (Cement and Concrete Composites, 33 (2003), 2510-2515).

39. Hisham Y. Qasrawi, “**The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 2017-2021).
40. Hirozo Mihashi, “**State of the art Report on control of Cracking in Early age Concrete**”, (Journal of Advanced Concrete Technology, nº 2 (2004), 141-154).
41. C. Maltese, “**Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars**”, (Cement and Concrete Research, 35 (2005), 2244-2251).
42. V. Morin, “**Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process**”, (Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1907-1914).
43. José Javier Sarría Odiaga, “**Efecto de los parámetros ambientales en la velocidad de corrosión del acero embebido en el hormigón. Incidencia de la fisuración del recubrimiento**”. Tesis Doctoral (1997).
44. Yves F. Houst, “**Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation**”, (Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1923-1930).
45. Eshmaiel Ganjian, “**Factors affecting measurement of hydraulic conductivity in low-strength cementitious materials**”, (Cement and Concrete Research, 36 (2006), 2109-2114).
46. W. Vichit-Vadakan, “**Measuring permeability and stress relaxation of young cement paste by beam bending**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 1925-1932).
47. Jeffrey J. Thomas, “**Effect of hydration temperature on the solubility behaviour of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in Portland cement pastes**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 2037-2047).

48. Barbara Lothenbach, “**Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement**”, (Cement and Concrete Research, 38 (2008), 337-349).
49. André Lecomte, “**The risk of cracking of fine hydraulic mixtures**”, (Cement and Concrete Research, 33 (2003), 1983-1997).
50. Ramazan Demirboga, “**Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral admixed concrete**”, (Cement and Concrete Research, 34 (2004), 2329-2336).
51. Claus Pade, “**The CO<sub>2</sub> uptake of concrete un a 100 year perspective**”, (Cement and Concrete Research, 37 (2007), 1348-1356).
52. Kritsada Sisomphon, “**Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials**”, (Cement and Concrete Research, 37 (2007), 1647-1653).
53. R. Talero, “**Los cementos, sus adiciones y su durabilidad**”. (Tratado de Rehabilitación. Tomo 3: Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales. Universidad Politécnica de Madrid).
54. Linhua Jiang, “**Durability of concrete incorporating large volumes of low-quality fly ash**”, (Cement and Concrete Research, 34 (2004), 1467-1469).
55. Liang Zhang, “**Investigation of the microstructure and carbonation of CSA-based concretes removed from service**”, (Cement and Concrete Research, 35 (2005), 2252-2260).
56. G. Cultrone, “**Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes**”, (Cement and Concrete Research, 35 (2005), 2278-2289).

57. Mehta. **“Concrete: structure, properties and materials”**, (P.K.W.J. Prentice-Hall. New Jersey, U.S.A. (1986)).
58. Alonso C., Acha M., Andrade C. **“Inhibiting effect of Nitrites on the corrosion of rebars embedded in carbonated concrete improvement of properties”** (RILEM). (Chapman and Hall, 219 (1990)).
59. Peter Pivonka, **“Microscopic effects on chloride diffusivity of cement pastes, a scale-transition analysis”**, (Cement and Concrete Research, 34 (2004), 2251-2260).
60. Alonso C., Andrade C. **“Effect of Nitrite as a corrosion Inhibitor in contaminated and Chloride-free carbonated mortars”** (ACI Materials Journal, Marzo-Abril, (1990)).
61. González J.A., López W. **“Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement”**, (Cement and Concrete, 23 (1993), 368-373).
62. Trevor J. Kirkpatrick, **“Probabilistic model for the chloride induced corrosion service life of bridge decks”**, (Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1943-1960).
63. **“Ficha técnica comercial Ceisa, casa comercial Ceisa (2005).**