

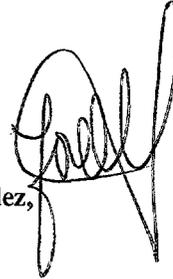
33/1997-98

**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
UNIDAD DE TERCER CICLO Y POSTGRADO**

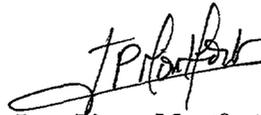
Reunido el día de la fecha, el Tribunal nombrado por el Excmo. Sr. Rector Magfco. de esta Universidad, el/a aspirante expuso esta TESIS DOCTORAL.

Terminada la lectura y contestadas por el/a Doctorando/a las objeciones formuladas por los señores miembros del Tribunal, éste calificó dicho trabajo con la nota de APTO CON LOPD
Las Palmas de Gran Canaria a 27 de febrero de 1998.

El/a Presidente/a: Dr. D. Secundino de León Pérez,



El/a Secretario/a: Dr. D. José Antonio Carta González,



El/a Vocal: Dr. D. Jean Pierre Montfort,

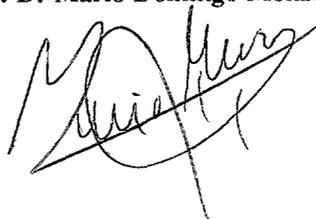


El/a Vocal: Dr. D. Agustín Macías Machín

El/a Vocal: Dr. D. Emilia Pérez Collar,



El/a Doctorando/a: D. Mario Domingo Monzón Verona,



**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO POR ORDENADOR DE CABEZALES DE
EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS**

**TESIS DOCTORAL PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL
PRESENTADA POR:
MARIO D. MONZÓN VERONA
DIRIGIDA POR:
FRANCISCO JAVIER CASTANY VALERI**



LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, NOVIEMBRE 1997

| |
|------------------------------|
| BIBLIOTECA UNIVERSITARIA |
| LAS PALMAS DE G. CANARIA |
| N.º Documento <u>537.111</u> |
| N.º Copia <u>537.121</u> |

A Begoña, mi mujer, y a mi hijo Aday

Quiero expresar mi agradecimiento personal a todas aquellas personas que han colaborado de alguna manera en la realización de esta Tesis Doctoral que es fruto de varios años de trabajo. Entre ellas a los compañeros del Laboratorio de Fabricación Integrada (Departamento de Ingeniería Mecánica) y en especial a José Cristobal Melián por su colaboración en el trabajo de campo realizado en la empresa PLASTICAN así como en la croquización de los diferentes cabezales probados. Al Director de Tesis D. Javier Castany por su orientación en el sentido de conseguir un trabajo dirigido principalmente a la industria de la extrusión. A D. Rafael Gómez y a Alejandro, Gerente y técnico de laboratorio de la empresa PLASTICAN respectivamente por su tiempo y medios dedicados para la realización de todas las pruebas efectuadas. A los compañeros del T.I.I.P.

ÍNDICE

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN

i

BLOQUE I. ASPECTOS PREVIOS SOBRE EL DISEÑO DE CABEZALES DE EXTRUSIÓN

2.- ESTADO DEL ARTE. HERRAMIENTAS COMERCIALES Y NO COMERCIALES DESARROLLADAS PARA EL ESTUDIO DE CABEZALES DE EXTRUSIÓN

I-1

3.- INFLUENCIA DEL DISEÑO DEL CABEZAL DENTRO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

I-11

3.1.- Influencia en la producción

I-11

3.2.- Influencia en las dimensiones del extrusado

I-12

3.3.- Influencia en la calidad del extrusado

I-14

BLOQUE II. METODOLOGÍA GENERAL Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.- ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE LOS CABEZALES CONSIDERADOS EN ESTE TRABAJO

II-1

5.- CARACTERIZACIÓN DE LOS POLÍMEROS A EXTRUIR

II-9

5.1.- Propiedades físico-térmicas

II-9

5.2.- Propiedades viscosas. Métodos aplicados

II-10

5.2.1.- Termoplásticos

II-11

5.2.2.- Elastómeros

II-13

5.2.3.- Ecuación WLF

II-15

6.- METODOLOGÍA GENERAL DE DISEÑO. PARÁMETROS A CONSIDERAR

II-17

6.1.- Especificaciones de diseño previas

II-17

| | |
|--|-------|
| 6.2.- Control de parámetros fundamentales | II-24 |
| 6.3.- Proceso general de diseño hasta converger a una solución válida | II-26 |
| 7.- ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FLUJO APLICADAS A LA EXTRUSIÓN | II-33 |
| 7.1.- Ecuaciones fundamentales | II-33 |
| 7.2.- Hipótesis simplificadoras y condiciones de contorno | II-34 |
| 8.- MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS EN GEOMETRÍAS SIMPLES Y CONDICIONES ISOTÉRMICAS. VISCOSIDAD | II-37 |
| 8.1.- Introducción | II-37 |
| 8.2.- Método de las viscosidades representativas (M.V.R.) | II-39 |
| 8.3.- Resumen de las expresiones analíticas utilizadas en DIEPLAST para el cálculo de los canales | II-41 |
| 9.- MÉTODO NUMÉRICO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS EN LOS CANALES DE FLUJO | II-43 |
| 9.1.- Simplificación de las ecuaciones fundamentales | II-43 |
| 9.2.- Expresiones integrales (velocidad, presión por unidad lineal) | II-44 |
| 9.3.- Discretización de las ecuaciones integrales | II-46 |
| 9.4.- Aplicación del método de diferencias finitas para la discretización y resolución de la ecuación de energía | II-48 |
| 9.5.- Desacoplamiento de la ecuación de energía y momento | II-51 |
| 9.6.- Algunos aspectos sobre la generación del mallado | II-53 |
| 10.- MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LOS DIFERENTES DISTRIBUIDORES Y DIFUSORES CONSIDERADOS | II-57 |
| 10.1.- Para geometrías de revolución | II-57 |
| 10.1.1.- Tipo araña | II-57 |
| 10.1.2.- De dos hileras de brazos concéntricos | II-58 |
| 10.1.3.- Helicoidal | II-60 |
| 10.2.- Para geometrías rectangulares tipo ranura | II-66 |
| 10.2.1.- Tipo "Coathanger" | II-66 |

| | |
|--|-------|
| 11.- UNA APROXIMACIÓN A LA DEFORMACIÓN DEL EXTRUSADO | II-71 |
| 11.1.- Viscoelasticidad de los polímeros | II-71 |
| 11.2.- Factor de hinchamiento (swell). Definiciones | II-75 |
| 11.3.- Visión general de los modelos viscoelásticos más utilizados | II-77 |
| 11.4.- Métodos considerados en el presente trabajo | II-80 |
| 11.4.1.- Método numérico de Wortberg y Junk | II-80 |
| 11.4.2.- Cálculo del factor de hinchamiento. Proceso de relajación | II-83 |
| 11.4.3.- Método analítico de Tanner | II-85 |
| 11.4.4.- Consideraciones a tener en cuenta | II-86 |

BLOQUE III. VERIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

| | |
|--|--------|
| 12.- COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS EN DIEPLAST CON OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES | III-1 |
| 12.1.- Caso 1. Cabezal de soplado | III-2 |
| 12.2.- Caso 2. Cabezal para tubos. Pruebas experimentales | III-8 |
| 12.3.- Caso 3. Ejemplo del programa DEFORM (PROWEX, IKV) | III-13 |
| 12.4.- Caso 4. Experiencias de Wortberg para determinar el factor de hinchamiento en geometrías tipo ranura | III-19 |
| 12.5.- Caso 5. Experiencias de N. Orbey y J.M. Dealy para determinación del factor de hinchamiento en geometrías anulares | III-25 |
| 12.6.- Caso 6. Comparación de factor de hinchamiento obtenido mediante el método de Tanner en DIEPLAST con el estudio numérico de E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos y F.A. Mirza | III-30 |
| 13.- OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL PROGRAMA DIEPLAST DESARROLLADO. ESTRUCTURA BÁSICA | III-33 |
| 13.1.- Objetivos y herramientas utilizadas | III-33 |

| | |
|--|---------------|
| 13.2.- Estructura básica | III-36 |
| 14.- PROCESO DE DISEÑO UTILIZANDO DIEPLAST | III-89 |
| 14.1.- Aportación desde un punto de vista metodológico | III-89 |
| 14.2.- Sistemática de trabajo | III-90 |
| 14.2.1.- Organización del proyecto | III-90 |
| 14.2.2.- Inicio y desarrollo de un proyecto | III-92 |
| 14.2.2.1.- Estudio pormenorizado para unas condiciones puntuales | III-92 |
| 14.2.2.2.- Estudio general del cabezal para un rango de trabajo | III-99 |
| 14.3.- Interactividad con otros programas de apoyo | III-101 |

BLOQUE IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN INDUSTRIAL

15.- EJEMPLO DE APLICACIÓN INDUSTRIAL CON EL PROGRAMA DIEPLAST. CABEZAL PARA EXTRUSIÓN DE TUBOS DE PVC

| | |
|--|-------|
| | IV-1 |
| 15.1.- Materia prima utilizada. Análisis reológico | IV-3 |
| 15.2.- Descripción general de la extrusora y cabezales a estudiar | IV-14 |
| 15.3.- Análisis de resultados y comparación con medidas en extrusora | IV-20 |
| 15.4.- Comparación con otros cabezales similares | IV-32 |
| 15.5.- Estudio de posibles alternativas de mejora | IV-39 |

BLOQUE V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

| | |
|--|------------|
| 16.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN | V-1 |
|--|------------|

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO A. CABEZALES UTILIZADOS EN LA APLICACIÓN INDUSTRIAL

ANEXO B. RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN CANAL ANULAR OBTENIDOS POR EL PROGRAMA PROWEX (MÓDULO DEFORM)

ANEXO C. RELACIÓN DE RUTINAS DE CÁLCULO PRINCIPALES QUE ANALIZAN EL PROCESO DE FLUJO

INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN.-

El presente trabajo surge por una necesidad planteada en el T.I.I.P. (Taller de Inyección de la Industria del Plástico), Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza); a partir de ella se inicia una colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de G.C. . Esta colaboración consiste en el desarrollo de una nueva línea de investigación dentro del campo de la *extrusión* y que ha desembocado en la Tesis Doctoral que lleva por título “*Diseño por Ordenador de Cabezales de Extrusión*”.

El trabajo ha sido dirigido por el catedrático del área de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Zaragoza *D. Fco. Javier Castany Valeri*.

El T.I.I.P. posee una amplia experiencia dentro del campo de la inyección con una estrecha colaboración con multitud de empresas dentro y fuera del estado español. Este contacto directo con la realidad industrial les ha llevado a adquirir un gran conocimiento de las necesidades que a nivel tecnológico tiene la industria de transformación de plásticos. En este contexto aparece la necesidad de iniciar una nueva línea de investigación en un campo que por razones que veremos luego no es tan estudiado como lo puede ser la inyección. Hablamos del campo de la extrusión, de gran importancia desde el punto de vista industrial y para lo cual solo tenemos que mirar a nuestro alrededor para darnos cuenta de la gran cantidad de elementos extruidos que existen.

Encontramos actualmente en el mercado diversos paquetes informáticos que contemplan la simulación del proceso de inyección y que ayudan considerablemente al diseño de moldes; así aparecen diferentes programas como el Moldflow, C-Flow, TM-Concept. que permiten validar un diseño determinado. En cambio, en la extrusión en todas sus variaciones, de tubos, películas, planchas, soplado, coextrusión, etc, no se han desarrollado con tal profusión las ayudas de sistemas en ordenador, de tal manera que los diseños se realizan con métodos totalmente experimentales. Resulta evidente la complejidad constructiva de un molde de inyección en relación a un cabezal (en

términos generales); ésto significa que un error en el diseño resultaría mucho más costoso en el caso de la inyección ya que mecanizar de nuevo total o parcialmente el molde, incluso en varias ocasiones, no es desde luego una práctica recomendable. En cambio el sistema prueba-error como pauta de diseño en cabezales de extrusión no representa en principio tanto costo aunque en algunos casos puede llegar a serlo. Esta manera empírica de actuar nos puede proporcionar una solución válida y que funcione pero siempre queda la duda de si el cabezal que hemos dado por bueno es mejorable. Las modernas técnicas CAD-CAE pretenden disminuir e incluso eliminar este proceso prueba-error con vistas a conseguir un menor tiempo entre la concepción del producto y su fabricación definitiva así como una solución más óptima.

Cierto es que hay programas de M.E.F. de propósito general que permitirían realizar un estudio, sin embargo, dado su carácter genérico y complejo se hace necesaria una herramienta que pueda ser utilizada por los tecnólogos de extrusión, con su propio lenguaje y con una estructura diseñada para tal fin. Además dicha herramienta debe ser de fácil manejo incluso por personas con pocos conocimientos informáticos.

Los objetivos principales del trabajo de investigación los resumimos en tres:

- a) Desarrollar una metodología para el diseño de cabezales de extrusión.*
- b) Integrar la amplia diversidad topológica de cabezales existentes, parametrizando al máximo sus características geométricas principales*
- c) Crear un paquete informático que recoja esta metodología y que resulte sencillo de utilizar por tecnólogos dentro del sector de extrusión.*

Para resumir el trabajo realizado la presente Tesis Doctoral se ha estructurado de la siguiente forma:

BLOQUE I: Aspectos previos sobre el diseño de cabezales de extrusión.

En este bloque se recojen además de los antecedentes y estado del arte en este campo una visión del autor sobre como influye un buen o mal diseño del cabezal en el proceso de extrusión en su conjunto así como una descripción topológica de los cabezales que se han parametrizado para el presente trabajo.

BLOQUE II: Metodología general y fundamentos teóricos.

Se trata de todos los aspectos relacionados con la metodología general de diseño y con los métodos de cálculo que se han empleado.

BLOQUE III: Verificación teórica y descripción general de la herramienta desarrollada (DIEPLAST).

Se comparan los resultados del trabajo con los obtenidos por diferentes autores bien a nivel teórico o a nivel experimental. Por otro lado se describe la estructura de la herramienta informática desarrollada y la metodología de trabajo diseñada para cumplir los objetivos planteados en un principio.

BLOQUE IV: Ejemplo de aplicación industrial con el programa DIEPLAST.

Utilizando la herramienta informática se aplica ésta a casos reales de la industria de la extrusión con comprobación a pié de máquina de la bondad de los resultados previstos.

BLOQUE V: Conclusiones y líneas futuras de investigación.

BLOQUE I

ASPECTOS PREVIOS SOBRE EL

DISEÑO DE CABEZALES DE

EXTRUSIÓN

2.- ESTADO DEL ARTE. HERRAMIENTAS COMERCIALES Y NO COMERCIALES DESARROLLADAS PARA EL ESTUDIO DE CABEZALES DE EXTRUSIÓN

No es la extrusión un proceso en el cual sea frecuente encontrar programas comerciales de gran difusión. Ya hemos comentado los motivos de esta circunstancia pero no obstante haremos un resumen de aquellos que han sido desarrollados por diferentes centros o institutos de investigación, bien para uso propio bien para un uso más comercial. Este tipo de programas los encontramos en referencias bibliográficas, libros o catálogos. En cualquier caso hacer mención al carácter tal vez excesivamente cientifista de muchos de ellos donde el proceso de diseño puede llegar a ser engorroso para el tecnólogo dado que no siempre tanta información es fácilmente canalizable y sirve como criterio de decisión.

Por otro lado indicar que una buena parte utilizan programas más amplios y que son de *propósito general*. Esto ocurre por ejemplo en varios que utilizan el M.E.F. que no son específicamente de extrusión.

Básicamente podríamos dividirlos en tres categorías según el método de cálculo que utilizan: métodos analíticos, método de elementos finitos (MEF), método de diferencias finitas (MDF). Una clasificación resumida atendiendo a diferentes criterios podemos verla en la tabla 1.

Otro aspecto a comentar es que en las referencias utilizadas existen programas desarrollados para un estudio específico pero que tal vez no tengan el rango de "programa comercial"; estas referencias se mencionan en la bibliografía. Como ejemplos de esto podríamos citar los trabajos de TSENG, HAN-SIU [2] y PAUL B. JUNK [3], aunque el trabajo de este último fue posteriormente base para el programa PROWEX [7,8] desarrollado en el IKV. Estos estudios han servido, entre otros, como puntos de comparación del presente trabajo de investigación.

A continuación mostraremos diferentes programas, unos con carácter más comercial que otros

POLIFLOW [1,17]

Programa de *propósito general por elementos finitos* diseñado inicialmente para el análisis de procesos de flujo industriales caracterizados por fenómenos viscosos no lineales y viscoelásticos. Utiliza diversos métodos numéricos basados todos ellos en elementos finitos para calcular flujos en geometrías complejas. No es en principio un programa específico para extrusión pero con la preparación adecuada de la geometría y condiciones de contorno nos permite analizar por ejemplo fenómenos de extrusión de fibras, coextrusión, perfiles tridimensionales, coextrusión tridimensional. Dispone de un preprocesado de datos (POLYDATA) y generación de malla (POLYMESH). Los resultados de POLYFLOW pueden ser leídos por el postprocesador POLYPLOT o por otros de PATRAN e I-DEAS. Funciona tanto en PC como en estación de trabajo aunque es esta última donde consigue sus mayores prestaciones, necesitando un ordenador muy potente cuando se estudian aplicaciones viscoelásticas o tridimensionales.

Permite considerar diferentes modelos reológicos además del newtoniano, como la ley exponencial, Carreau, Bingham, Herschel-Bulkley. En cuanto a los modelos viscoelásticos considera los modelos diferenciales de Maxwell-B, Olroyd-B, White-Metzner, Phan Thien-Tanner y Giesekus-Leonov.

LATMULTI, LATWIRE, LATROLL [4]

Este software realiza el estudio del fenómeno de la *coextrusión* en cabezales de geometrías sencillas, de aplicación en la fabricación de láminas y films para la industria de envasado de comida donde cada capa proporciona características específicas que en su conjunto dan al producto una alta garantía de resistencia, impermeabilidad, etc.

Se basan en la teoría de la “Lubricación Aproximación” (LAT), aplicada por Heng y Mitsoulis y con la que se obtienen resultados tan buenos como con el M.E.F..

El programa LATMULTI es aplicable a la coextrusión de láminas gruesas, film, cables eléctricos con diferentes capas, “macarrones” coextrusionados para posterior soplado.

Las entradas del LATMULTI, LATWIRE y LATROLL son la geometría de los canales de flujo, parámetros de operación (temperatura, producción, etc), propiedades del material. Las salidas son la distribución axial de presiones, tensiones de cortadura y temperaturas para cada capa, velocidad, tensión de cortadura y viscosidad en cualquier posición axial, presión total.

Simplifica enormemente las ecuaciones fundamentales al reducir el problema a ecuaciones diferenciales ordinarias y de una sola dimensión. En general se obtienen buenos resultados excepto cuando el canal tiene ángulos mayores de 10° . Asimismo no tiene en cuenta efectos viscoelásticos.

POLYCAD [5]

Es un programa basado en M.E.F. compuesto de tres módulos independientes, 1D, 2D, 3D, donde los elementos de la malla se generan automáticamente y las condiciones de contorno se seleccionan de un menú. No está diseñado para un proceso específico, simplemente se trata de definir adecuadamente las condiciones de contorno y geometría para resolver el problema. Tiene en cuenta efectos viscoelásticos, lo que permite calcular el hinchamiento (Swell). No obstante se supone que la respuesta viscoelástica depende de los valores locales de viscosidad elongacional y la diferencia de tensión normal principal, lo cual implica no considerar efectos de memoria, que es aplicable a varios procesos.

EXTRUD, DIEPAK, DIEDES [6]

EXTRUD es un paquete de uso específico de extrusión que no solamente analiza el cabezal (módulos DIEPAK, DIEDES) sino que estudia el proceso de extrusión en su conjunto, principalmente el husillo. Tengamos en cuenta la importancia de la interacción husillo-cabezal para encontrar el punto de trabajo de la extrusora.

DIEPAK es un módulo de EXTRUD que permite el diseño de cabezales para fabricación de láminas gruesas, film plano y film soplado. El módulo DIEDES diseña el distribuidor progresivo de paso de una sección circular a una sección plana (coathanger) consiguiendo una buena uniformidad en todo el espesor de la lámina extruída.

PROWEX [7,8]

PROWEX es un programa desarrollado en el IKV [47] de diseño específico de cabezales. Está compuesto por diferentes módulos que analizan geometrías simples así como distribuidores. Estos módulos son: AVEXID, VERTIGO, WENVERTI, COEX, DEFORM.

AVEXID es un módulo que incluye el cálculo de geometrías circulares anulares y rectangulares tipo ranura. También distribuidores tipo torpedo, coathanger o en cola de pescado. El método de cálculo es completamente analítico utilizando el “Método de las Viscosidades representativas” y en condiciones isotérmicas. El resultado del cálculo es la caída de presión y geometría del distribuidor.

El módulo VERTIGO analiza los distribuidores para slits, rectos, de cola de pescado y curvados. Utiliza un método por el cual se divide la geometría del distribuidor en segmentos y se resuelve como si de un circuito de resistencias eléctricas se tratase. Los resultados del programa son: caída de presión, tiempo de residencia, volumen por unidad de tiempo a la salida, velocidad de cizalla y tensión de cortadura en pared. también utiliza el método de viscosidades representativas y condiciones isotérmicas.

El módulo WENVERTI simula las condiciones de funcionamiento de un distribuidor espiral, donde existe por un lado un flujo espiral y por otro lado un flujo anular. el método divide el canal espiral en pequeños segmentos sobre los cuales se realiza un balance volumétrico. El objetivo es conseguir la mayor uniformidad de caudal a la salida. Los resultados del programa son:

* A lo largo de la espiral

- Presión
- Flujo anular y espiral
- Velocidad de cizalla y tensión de cortadura en pared
- Tiempo de residencia

* A la salida

- Distribución del caudal en porcentaje sobre el caudal medio
- Tiempo de residencia

Se utilizan viscosidades representativas y condiciones isotérmicas.

DEFORM calcula el flujo en cabezales de geometría de revolución (por ejemplo para fabricar tubos o elementos para posterior soplado) utilizando el Método de Diferencias Finitas (MDF). Considera condiciones no isotérmicas y analiza el proceso de deformaciones reversibles dentro del cabezal que darán lugar en la salida a la posibilidad de estimar el factor de hinchamiento (Swell). Hay que definir pues un mallado sobre el cual se calcularán los siguientes parámetros:

- Perfil de velocidades
- Perfil de temperaturas
- Perfil de velocidades de cizalla
- Perfil de tensiones de cortadura
- Perfil de viscosidades
- Tiempo de residencia

- Caída de presión
- Estudio de deformación

Se apoya en el método de Wortberg y Junk [3,33] (utilizado en el presente trabajo de investigación) para analizar el estudio de deformación, considerando efectos de memoria.

El módulo COEX calcula procesos de coextrusión para cabezales planos en condiciones isotérmicas.

MICROPUS [9]

Es un programa para el diseño reológico y térmico de cabezales de extrusión y coextrusión utilizando M.E.F.. Implementa geometrías complejas tridimensionales.

Tiene un preprocesador que posibilita de forma interactiva con el usuario definir la malla e introducir las condiciones de contorno.

La geometría es inicialmente dividida en macroelementos por el usuario para posteriormente el sistema generar automáticamente un mallado fino. De esta forma el usuario puede tener un mayor control sobre la estructura de la malla con un pequeño esfuerzo.

El resultado son diferentes ficheros (velocidad, temperatura, etc) o gráficos de campo con isolíneas de los diferentes parámetros.

La principal aportación de este programa es el estudio térmico de las paredes del cabezal donde podemos definir en que zonas es necesario enfriar y en que zonas calentar.

FAβEST [10]

También aplica M.E.F. pero solo estudia aspectos reológicos, no viscoelásticos. Perfiles tridimensionales e interface gráfico interesante.

PASS [11]

PASS se divide en diferentes módulos donde se integran el estudio del husillo y del cabezal. Los módulos referentes a este último son:

- MDE. Editor de geometría y datos de cabezal tipo torpedo
- MDS. Simulación numérica no isotérmica, no newtoniana del flujo en cabezal tipo torpedo
- CDS. Simulación numérica de distribuidores tipo “coathanger”
- SDS. Simulación numérica de distribuidores espirales para cabezales de soplado de film

Comentar que para la estimación del factor de hinchamiento utiliza las expresiones empíricas de Tanner partiendo del número de Deborah. No tiene en cuenta el efecto memoria.

VISPIDER, VISCOAT, VISPIRAL [12]

Son tres módulos que siguen en la línea de algunos de los ya tratados anteriormente.

VISPIDER analiza cabezales tipo torpedo, VISCOAT para distribuidores tipo “coathanger” y VISPIRAL para distribuidores espirales, donde los tres parámetros de diseño son caída de presión, velocidad de cizalla y temperatura.

COEXCAD, SPIRALCAD, FLATCAD [13]

COEXCAD (coextrusión), SPIRALCAD (distribuidores espirales) y FLATCAD (distribuidores tipo coathanger) son módulos que también utilizan métodos de cálculo rápidos sin la complejidad de los M.E.F.

A modo de resumen mostramos la siguiente tabla que se ha realizado para observar un análisis comparativo simplificado de las diferentes opciones estudiadas.

M.E.F.: Método de elementos finitos

D.F.: Diferencias finitas

O: Otros

C: Distribuidor tipo Coathanger

CP: Distribuidor tipo cola de pescado

H: Helicoidal

T: Tipo torpedo

| MÉTODO DE CÁLCULO | GEOMETRÍAS | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------|-------|-----------|------|--------|-----------|--------|----|--------|
| | M.E.F. | D.F. | OTROS | PROPOSITO | SLIT | REVOL. | TRIDIMEN. | VISCO. | NO | COEXT. |
| | GENERAL | | | | | | | | | |
| | C | CP | O | H | T | O | | | | ISOT. |
| POLIFLOW | X | | | | | | X | X | X | X |
| LATMULTI | | | | | | | | | | |
| LATWIRE | X | | | | X | | | | X | X |
| LATROLL | | | | | | | | | | |
| POLYCAD | X | | | | | | X | X | X | X |
| DIEPAK | X | | | | X | | | | | |
| DIEDES | | | | | | | | | | |
| PROWEX | X | | | | X | X | X | X | X | X |
| MICROPUS | X | | | | | | X | | X | X |
| FAßEST | X | | | | | | X | | X | |
| PASS | X | | | | X | X | X | X | X | X |
| VISPIDER | | | | | | | | | | |
| VISCOAT | X | | | | X | | | X | X | |
| VISPIRAL | | | | | | | | | | |
| COEXCAD | | | | | | | | | | |
| SPIRALCAD | X | | | | X | | | X | X | X |
| FLATCAD | | | | | | | | | | |

3.- INFLUENCIA DEL DISEÑO DEL CABEZAL DENTRO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.-

Existe una importante interconexión entre el cabezal y el resto de los elementos de la extrusora, que podemos dividirla en general en tres partes fundamentales.

- Sistema de alimentación, calefacción y homogeneización.
- Cabezal.
- Sistema de enfriado y calibrado.

Ello significa que un estudio profundo del cabezal debe ir acompañado de un estudio adicional de estos elementos complementarios ya que la combinación de éstos da como resultado las características finales del producto.

En este apartado entraremos en la influencia directa e indirecta que tiene el cabezal no solo en dichas características finales sino también en el proceso de extrusión.

3.1.- Influencia en la producción.-

Independientemente de los aspectos formales del extrusado hemos de considerar que, como ocurre en cualquier proceso industrial, uno de los objetivos primordiales es conseguir una alta producción. Esta producción la parametrizamos en kg/hora que al fin y a la postre representan metros lineales de producto. Sin embargo, el problema radica en que producciones altas no siempre son posibles en función no solamente del propio cabezal (que veremos luego) sino de la capacidad de la propia extrusora que se refleja directamente en el husillo.

Si observamos la figura (3.1) [15,16], donde representamos la caída de presión en el cabezal frente a la producción podemos observar que la curva característica del husillo (para una velocidad de giro n) es descendente debido a que a mayor resistencia a la salida del mismo menor es la producción (efecto de reflujo). Por otro lado si en el

mismo gráfico representamos la curva característica del cabezal tenemos justamente el efecto contrario (a mayor producción mayor caída de presión).

La intersección de ambas curvas es el punto de trabajo, que marca la producción final. Nos encontramos pues con múltiples posibilidades de trabajo en función de cual sea la curva del cabezal y cual la del husillo. En el presente trabajo se mostrarán las diferentes curvas del cabezal que para un husillo concreto nos dan las condiciones más óptimas.

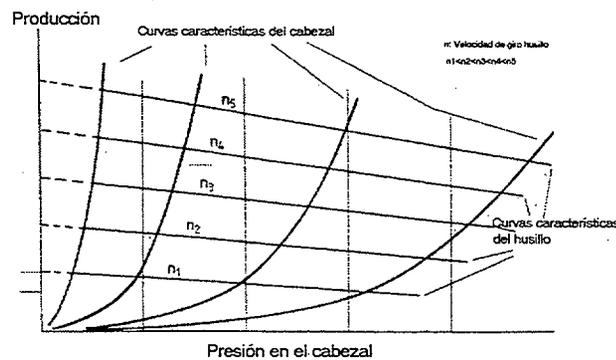


Fig. 3.1. Curvas características husillo-cabezal

3.2.- Influencia en las dimensiones del extrusado.-

En una buena parte de los perfiles extrusionados las dimensiones finales se han de mover dentro de unas estrechas tolerancias (tubos, perfiles de ventana, etc). En otros casos, como ocurre en los perfiles de *elastómeros* tales dimensiones tienen un margen de error mayor precisamente por el carácter elástico de los mismos (por ejemplo la junta de una ventana abatible). Pero en cualquier caso es importante predecir aunque sea de forma aproximada tales dimensiones. En la tabla 3.1 [17] podemos ver algunas de las tolerancias admitidas para tubos de PVC.

| Diámetro nominal | Tolerancia de diámetro | Espesor | Tolerancia espesor |
|------------------|------------------------|---------|--------------------|
| 75 | +0.3 0 | 1.8 | +0.4 0 |
| 75 | +0.3 0 | 2.2 | +0.5 0 |
| 110 | +0.3 0 | 2.2 | +0.5 0 |
| 110 | +0.3 0 | 3.2 | +0.6 0 |

Tabla 3.1.- Tolerancias admitidas para tubos de PVC (tubería de presión)

En la extrusión de elastómeros la geometría final del extrusado es principalmente definida por el cabezal aunque el posterior vulcanizado influya pero en menor medida. Sin embargo en muchos procesos de extrusión a continuación del cabezal se sitúa una unidad de enfriamiento y calibración que es la responsable final de las dimensiones (aunque no de todas, por ejemplo en tubos si solo calibramos por el exterior calibrará el diámetro pero no el espesor).

El sistema de *calibración* [15,18] adapta al extrusado a la forma de un elemento calibrador con las medidas exactas que se pretenden a la vez que se enfría. Esta operación puede efectuarse bien por vacío o por soplado de aire. Acompañado de este proceso también se somete a veces (no recomendado) al extrusado a un estirado mediante unos arrastradores con lo cual coordinando la velocidad de salida del cabezal y la de estos arrastradores logramos un espesor deseado.

Vemos pues la dificultad de conseguir las secciones exactas del perfil tan solo al salir del cabezal. No vale el planteamiento sección de salida= sección del perfil por el motivo principal de que los polímeros se comportan como materiales viscoelásticos [15,19,20] y sufren un fenómeno de *recuperación*. Este trabajo de investigación utiliza algunos de los métodos desarrollados para estimar esta deformación, no obstante este es un campo donde se sigue trabajando dada las limitaciones que en diferentes hipótesis alcanzan las teorías elaboradas por diversos grupos de trabajo.

En la práctica se opta por utilizar la experiencia y por supuesto un sistema de calibración.

En este contexto y exceptuando a los elastómeros, ¿ Qué sentido tiene la estimación de las dimensiones del extrusado a la salida del cabezal?. Sí parece razonable que un proceso de calibrado (e incluso estirado) agresivo, es decir, deformando mucho el perfil para conseguir las medidas deseadas, no es bueno ya que crea una serie de tensiones residuales que permanecerán en el producto. estas tensiones se pueden observar e incluso cuantificar sus efectos en un ensayo de “ tensiones internas” por el cual se toma una muestra del perfil fabricado y se introduce en un baño caliente de siliconas a una determinada temperatura. Podemos observar en este ensayo una contracción que según unos límites preestablecidos puede ser admisible o no.

Si ante dos opciones de diseño posible tenemos una donde el nivel de deformación a la salida es menor a la otra sería más lógico optar por ésta si ello significa tener que “calibrar menos” para llegar a las dimensiones deseadas. Por lo tanto concluimos en que este será un parámetro a considerar en el presente trabajo, aunque solo sirva para efectuar una valoración cualitativa y comparativa entre diferentes alternativas.

3.3.- Influencia en la calidad del extrusado.-

En este apartado nos referiremos a calidad desde un punto de vista de estado superficial y homogeneidad del material en el producto.

En la calidad no solo van a influir las condiciones de trabajo (producción (Kg/h), temperatura) sino también la geometría del cabezal. Una mala elección del diseño puede originar defectos tales como:

- Rotura de la continuidad (melt fracture [15,18,21]) del extrusado, provocada por un exceso de tensión de cortadura en el interior del cabezal, aceleraciones bruscas, etc.

- Falta de homogeneidad del material por una mala compactación en el cabezal a continuación del distribuidor o difusor.
- Marcas en la superficie (falta de soldadura) por un mal diseño del difusor y zonas posteriores.
- Degradación del material por permanecer excesivo tiempo dentro del cabezal y estar sometido a una alta temperatura.
- Fenómenos de rugosidad (por ejemplo piel de serpiente) y degradación por excesivo nivel de velocidad de cizalla y aceleración sobre todo a la salida.

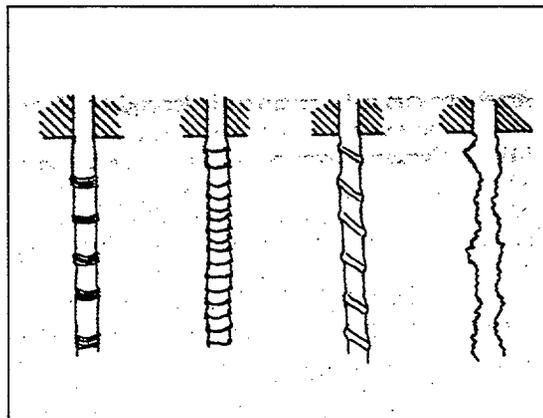


Fig. 3.2. Algunos defectos de rotura de la continuidad

Aunque algunos de estos fenómenos todavía no están completamente explicados en cuanto a las causas que los originan podemos orientar al diseñador o usuario mediante el control de algunos parámetros básicos en el sentido de limitarlos para que no se produzcan.

Valorar estos parámetros junto con los de los dos apartados anteriores será labor del diseñador que deberá sopesar las diferentes alternativas posibles y en muchos casos renunciar a optimizar al máximo un aspecto en favor de otros.

BLOQUE II

METODOLOGÍA GENERAL Y

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.- ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE LOS CABEZALES CONSIDERADOS EN ESTE TRABAJO.-

En el programa *DIEPLAST* se han contemplado diferentes posibilidades de tal forma que podemos diseñar una variada tipología de cabezales de una forma cómoda.

Una primera clasificación de los cabezales implementados [15,18] la podemos hacer en función del *producto a fabricar* (Tabla 4.1):

- Cabezales para fabricación de film plano.
- Cabezales para fabricar láminas finas.
- Cabezales para fabricar láminas gruesas.
- Cabezales para fabricación de barras circulares macizas.
- Cabezales para fabricación de tubos circulares.
- Cabezales para fabricar film soplado.
- Cabezales para fabricar el “macarrón” previo a un proceso de soplado.

Como ya explicaremos en apartados posteriores la metodología para definir gráficamente estos cabezales es la misma, simplificando al máximo la introducción de datos por parte del operador. Esto significa que no existen menus específicos para cada uno de ellos sino que es el diseñador el que orientará cada uno de sus diseños hacia el tipo de producto que se desea fabricar.

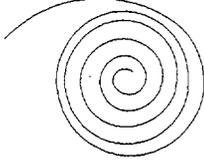
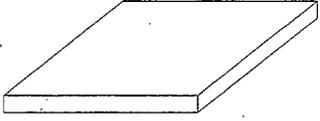
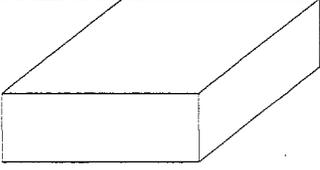
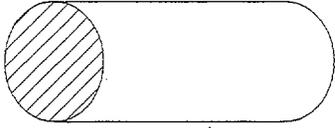
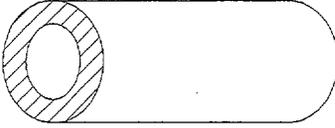
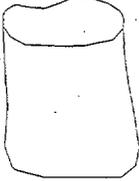
| | |
|---|--|
| <p>Fabricación de film plano</p> |  |
| <p>Fabricación de láminas planas</p> |  |
| <p>Fabricación de láminas gruesas</p> |  |
| <p>Fabricación de barras macizas circulares</p> |  |
| <p>Fabricación de tubos circulares</p> |  |
| <p>Fabricación de film soplado</p> |  |
| <p>Fabricación de piezas por soplado</p> |  |

Tabla 4.1.- Cabezales incluidos en DIEPLAST según el producto a fabricar

Sin tener en cuenta los distribuidores, que estudiaremos luego, un segundo criterio clasificatorio es el tipo de *geometría básica* de los canales de flujo

- Canales de sección tipo ranura (slit). Tabla 4.2.
- Canales de sección circular. Tabla 4.2.
- Canales de sección anular. Tabla 4.2

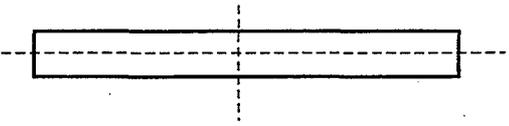
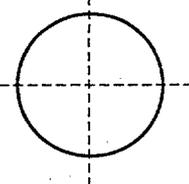
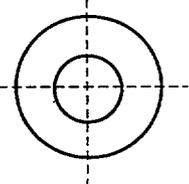
| | |
|---------------------|--|
| Sección tipo ranura |  |
| Sección circular |  |
| Sección anular |  |

Tabla 4.2.- Canales según sección

A su vez estos canales se dividen en tramos, entendiendo por tramo un espacio en el cual ni la línea superior o inferior del canal sufren un cambio de dirección. Según sea la *geometría del tramo* tenemos las siguientes posibilidades (Tabla 4.3) :

- Tramo tipo ranura de sección constante.
- Tramo tipo ranura de sección variable.
- Tramo circular de sección constante.
- Tramo circular de sección variable.
- Tramo anular de sección constante.
- Tramo anular de sección variable linealmente.
- Tramo anular de sección variable genérica.

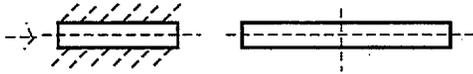
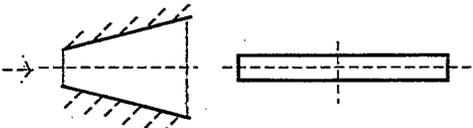
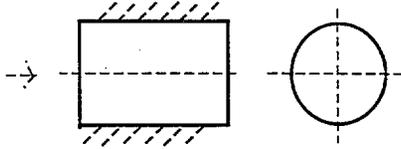
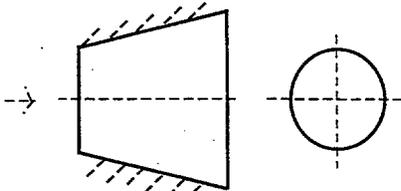
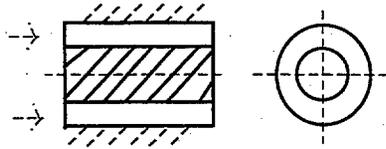
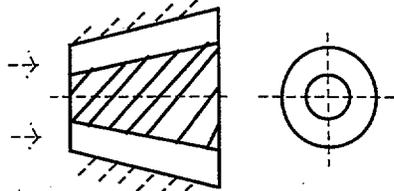
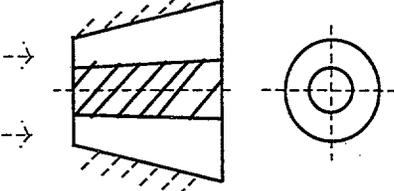
| | |
|--|--|
| <p>Ranura de sección constante</p> |  |
| <p>Ranura de sección variable</p> |  |
| <p>Circular de sección constante</p> |  |
| <p>Circular de sección variable</p> |  |
| <p>Anular de sección constante</p> |  |
| <p>Anular de sección variable con abertura constante</p> |  |
| <p>Anular de sección variable genérica</p> |  |

Tabla 4.3.- Clasificación de los tramos contemplados por DIEPLAST

Los canales de flujo conforman una buena parte de la geometría que está en contacto con la masa. Las cualidades que deben tener son:

- Deben terminar de homogeneizar el material.
- Deben evitar zonas de posible estancamiento de flujo.
- Deben proporcionar zonas de relajación de deformaciones en los casos que fuese necesario.
- Las transiciones entre tramos deben ser suaves.
- Deben ser diseñados para disminuir al máximo fricciones elevadas.
- Deben proporcionar zonas de compresión por ejemplo a la salida de distribuidores para eliminar la influencia de estos en el acabado superficial del extrusado.
- Deben tener una alta dureza y acabado superficial.
- En cabezales desmontables los ajustes de unión entre tramos deben ser bastante buenos.

Otros elementos básicos en la morfología de los cabezales son lo que llamaremos genéricamente “distribuidores” aunque no siempre tienen la misión de distribuir propiamente dicha (difusores o soportes). Los incluidos en este trabajo son:

a) Tipo “coat-hanger”. (Fig. 4.1) [15,18]

Utilizados para transformar un flujo de sección circular en otro de sección plana tipo *ramura*. Se aplica en la fabricación de film y láminas planas. la ventaja de su diseño especial estriba en que consigue una evolución uniforme del flujo a la salida del mismo. A pesar de la complejidad de su fabricación es bastante empleado.

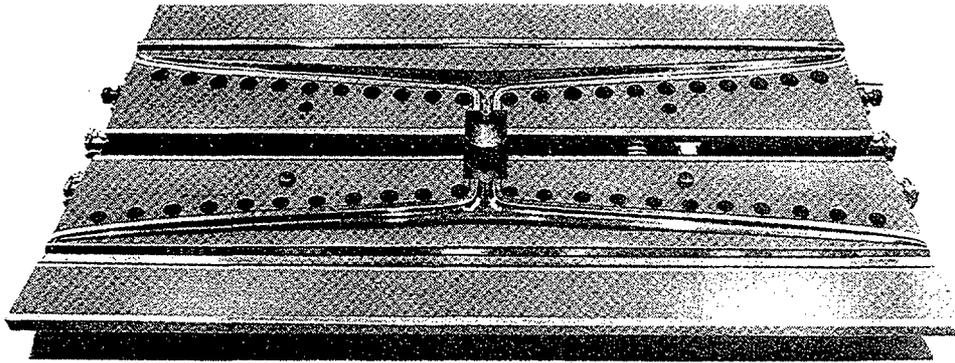


Fig. 4.1. Distribuidor tipo "coat-hanger"

b) Tipo araña. (Fig. 4.2) [15,16,18,22]

También llamado *difusor*, es uno de los más aplicados en la extrusión de tubos. Su misión es principalmente la de soporte del torpedo y macho interior al flujo. Debe soportar los importantes esfuerzos que se pueden generar en el interior. Consiste en una serie de brazos radiales que unen un disco interior al bastidor exterior. Estos brazos actuarán como obstáculos en el flujo del polímero, lo que producirá una distorsión en el mismo que habrá que solucionar posteriormente con una adecuada zona de compresión. los brazos tienen un perfil aerodinámico y deben evitar que se estacione una parte del polímero en dicha zona ya que se podría producir una "quemada" no conveniente para la extrusión. El número de brazos dependerá lógicamente del diámetro exterior

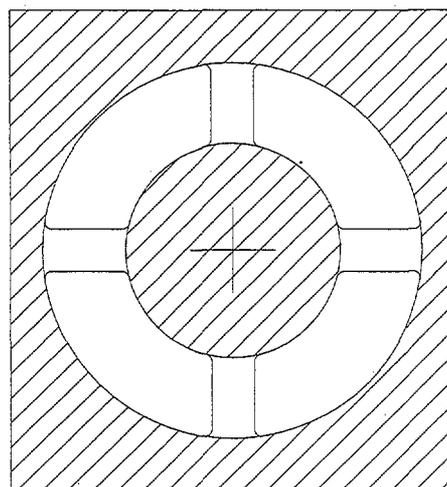


Fig. 4.2.- Soporte tipo araña

c) Soporte de dos hileras de brazos (support ring). (Fig 4.3) [15,8,3]

Es similar al tipo araña pero tiene dos hileras de brazos mas cortos, lo que proporciona una mayor estabilidad estructural. No obstante el fluido tiene más dificultades para atravesarlo ya que el espacio que queda es menor. se utiliza por ejemplo en los cabezales de extrusión de los comunmente llamados “macarrones” que posteriormente son soplados para producir cuerpos huecos (botellas, envases, etc).

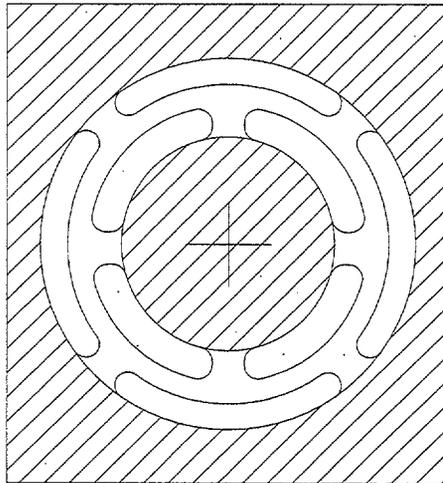


Fig. 4.3.- Soporte de dos hileras de brazos

d) Distribuidores espirales. (Fig. 4.4) [15,18,23,24,25]

A pesar de la dificultad de fabricación de estos elementos es un sistema muy popular y útil ya que elimina las desventajas del soporte tipo araña. Se aplica para extrusión de tubos (por ejemplo de polietileno) o para film soplado.

El flujo en este distribuidor es de dos tipos, uno *anular*, hacia adelante y otro *espiral* a lo largo de las hélices que rodean al macho interior del canal. Es un flujo combinado que precisamente es lo que dificulta su cálculo y diseño.

La principal ventaja se encuentra en el alto grado de uniformidad que se consigue en el espesor del extrusado a la salida, proporcionado por un caudal que varía poco con respecto a un valor medio; pensemos, por ejemplo, en el film soplado y la importancia de tener un espesor constante.

Aunque la modelización geométrica de éste y del resto de los distribuidores la haremos en apartados posteriores decir que se conforma por varias hélices que evolucionan con el mismo ángulo y con una profundidad que disminuye hasta hacerse cero, transformándose en un sistema completamente anular.

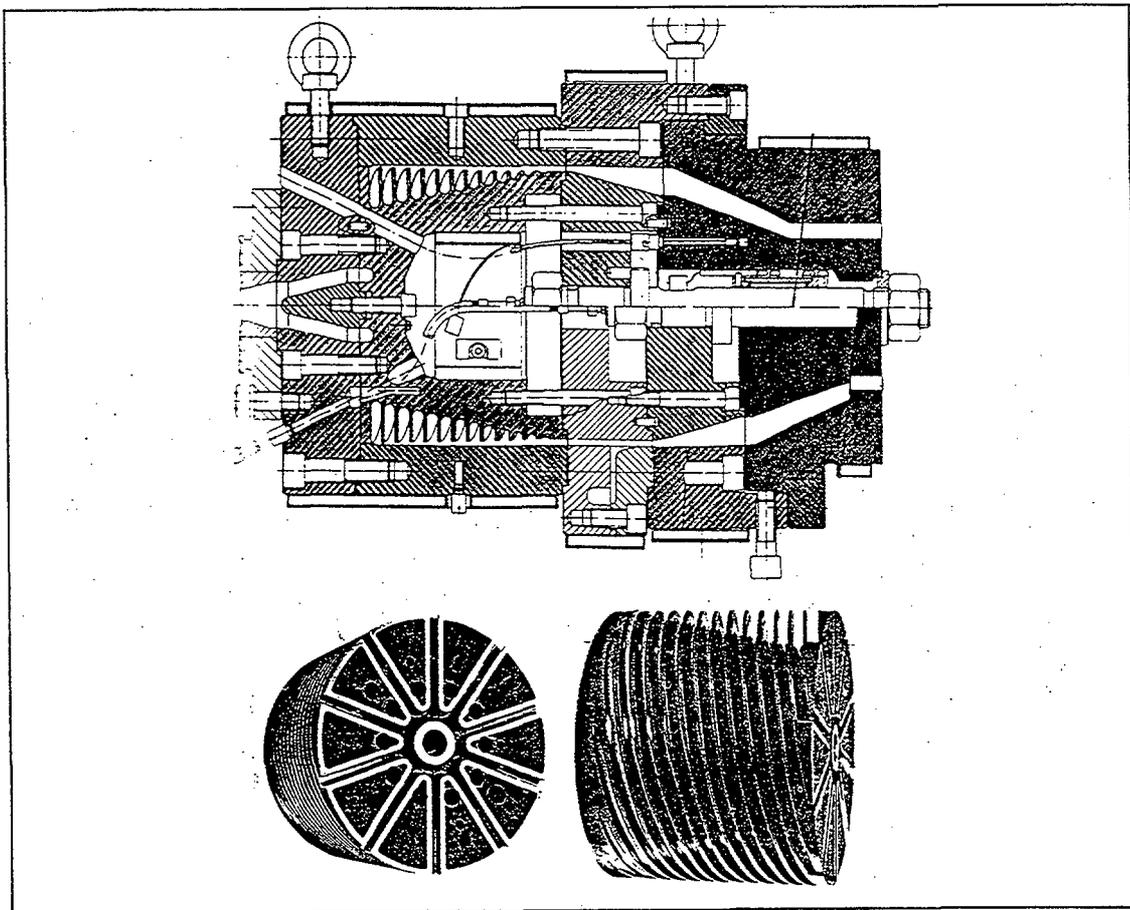


Fig 4.4.- Distribuidor espiral (Cincinnati Milacron)

5.- CARACTERIZACIÓN DE LOS POLÍMEROS A EXTRUIR.-

5.1.- Propiedades físico-térmicas.-

Desde un punto de vista térmico y físico hemos de considerar una serie de parámetros que van a influir en las condiciones de flujo del polímero. estos son la densidad, el calor específico y la *conductividad térmica*.

La densidad (ρ) es en principio dependiente de la presión y temperatura y podríamos definirla mediante el diagrama PVT (Fig 5.1) donde V es el volumen específico(inversa de la densidad). Sin embargo en los procesos de extrusión se suele considerar que el flujo es incompresible para las condiciones de trabajo.

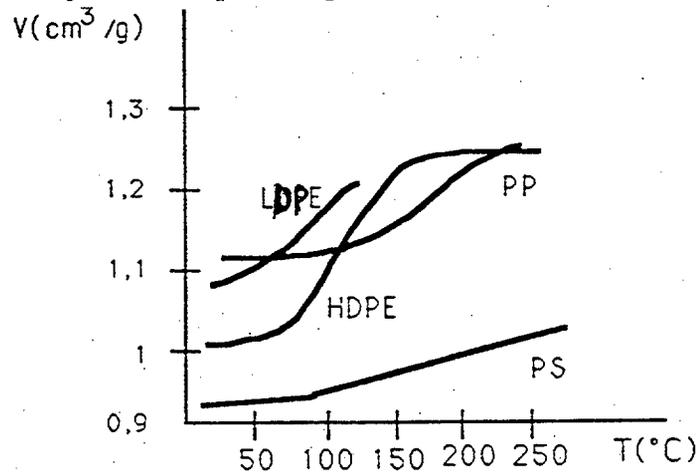


Fig. 5.1.- Diagrama PVT

Para el cálculo de la densidad a una temperatura, partiendo de un valor de referencia a una temperatura de referencia utilizaremos en nuestro programa la siguiente expresión [15]:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \times \frac{1}{1 + \alpha \times (T - T_0)} \quad (5.1)$$

Donde:

α : Coeficiente de dilatación lineal

$\rho(T_0)$: Densidad a una temperatura de referencia T_0

$\rho(T)$: Densidad a la temperatura T

El calor específico (C_p) a presión constante y el calor específico a volumen constante (C_v) apenas difieren un 10% y para nuestros cálculos los tomaremos como iguales [21] así como constante dentro del rango de temperaturas de trabajo [26].

La conductividad térmica (λ) tiene también una dependencia de la temperatura pero sin embargo podemos considerar con una buena seguridad que es constante en el rango de temperaturas en el cual nos movemos [15,26]. del mismo modo su dependencia con la presión es muy baja (5% para un incremento de 250 Bar) [27,26]

Hacer una consideración especial a los *elastómeros* que mantienen valores de C_p y λ similares a los termoplásticos así como la poca influencia de la temperatura. Solo en la densidad media presentan valores superiores por la carga que es añadida en la práctica para su uso.

5.2.- Propiedades viscosas. Modelos aplicados.-

La elección del modelo que represente adecuadamente la evolución de la viscosidad (η) con respecto a la velocidad de cizalla (γ) es un punto importante dentro del proceso de cálculo. Se trata de modelizar analíticamente las curvas de viscosidad (Fig. 5.2) que obtenemos del reómetro para diferentes temperaturas.

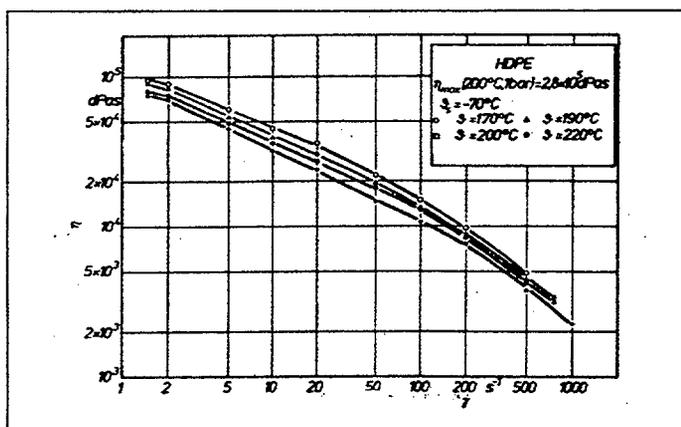


Fig. 5.2.- Curva de viscosidad a diferentes temperaturas

El caso más simple es considerar el fluido como newtoniano donde se cumple :

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma} \tag{5.2}$$

τ : Tensión de cortadura η : Viscosidad (constante) $\dot{\gamma}$: Velocidad de cizalla (dv/dy)

La consideración de viscosidad constante en fluidos newtonianos no es válida para los *pseudoplásticos* donde es necesario relacionar la viscosidad no solamente con la temperatura sino también con la velocidad de cizalla o sea:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \times \dot{\gamma} \tag{5.3}$$

Los modelos aplicados en le presente trabajo de investigación son los indicados a continuación tanto para termoplásticos como para elastómeros.

5.2.1.- Termoplásticos.-

* Ley exponencial (Ostwald y de Waele)

$$\dot{\gamma} = \phi \times \tau^m \tag{5.4}$$

$\dot{\gamma}$: Velocidad de cizalla ϕ : Fluidez τ : Tensión de cortadura m: Parámetro

En el diseño de cabezales de extrusión nos movemos en un rango de m que oscila entre 2 y 4 [15]. podemos observar que para $m=1$ $\phi=1/\eta$ y nos encontraríamos en el caso newtoniano.

De 5.2 y 5.4 obtenemos:

$$\eta = k \times \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5.5)$$

k: Factor de consistencia n: exponente de viscosidad ($0.7 \div 0.2$ [15])

Su aplicación es aceptable por encima de un determinado valor de velocidad de cizalla.

* *Ecuación de Carreau*

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{A}{(1 + B \times \dot{\gamma})^C} \quad (5.6)$$

A: Pa x Sg B: Sg C: Adimensional

La ventaja con respecto a la ley exponencial es que permite el cálculo de una viscosidad aceptable incluso para $\dot{\gamma} \rightarrow 0$.

En la Fig. 5.3 vemos como el parámetro A representa la viscosidad para $\dot{\gamma} = 0$

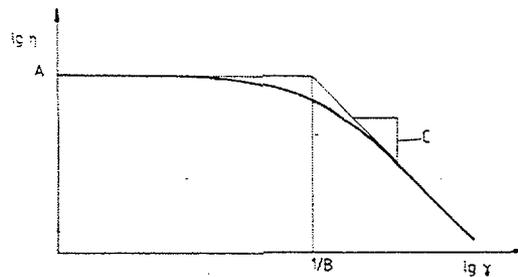


Fig. 5.3.- Modelo de Carreau

* *Modelo polinomial o logarítmico de 6 constantes*

$$\text{Log} \eta = A_0 + A_1 \times \text{Log} \dot{\gamma} + A_2 \times (\text{Log} \dot{\gamma})^2 + A_3 \times (\text{Log} \dot{\gamma}) \times T + A_4 \times T + A_5 \times T^2 \quad (5.7)$$

Si bien este modelo ha sido criticado por su carácter empírico, es cierto que cumple todos los requisitos exigibles a un modelo viscoso y que realiza un ajuste correcto en un rango más amplio de ratios de velocidad de cizalla. no obstante a valores muy bajos de $\dot{\gamma}$ no predice la viscosidad de forma apropiada. por ello hemos establecido un valor crítico $\dot{\gamma}_0$ [2] :

$$\text{Log} \dot{\gamma}_0 = -(A_1 + A_3 \times T) / (2 \times A_2) \quad (5.8)$$

Por debajo de este valor crítico de $\dot{\gamma}_0$ consideraremos que el polímero se comporta como un fluido newtoniano y por lo tanto $\eta = \text{cte}$, valor que se calcula sustituyendo el $\dot{\gamma}_0$ obtenido en 5.8 en la expresión 5.7.

5.2.2.- Elastómeros [15].-

El tratamiento que daremos en el programa de cálculo a los elastómeros es en general bastante similar al dado a los termoplásticos excepto en la consideración de una "yield stress" límite particular de los elastómeros.

La especificidad de los elastómeros estriba principalmente en la presencia de relleno para reforzar el material y que ejerce un efecto sobre la distribución de gradientes en el flujo que debe ser tenido en cuenta., Fig. 5.4.

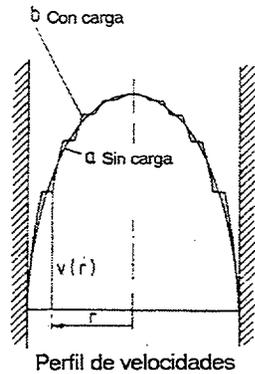


Fig. 5.4.- Flujo de elastómeros

El fenómeno de “yield stress” ocurre debido a la interacción entre partículas de relleno por el cual el material *no fluye* por debajo de una tensión τ_0 y se comporta como un cuerpo sólido. Esto puede ser observado en los cauchos naturales.

La ley de flujo que aplicaremos es la de Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_0 + k \times \dot{\gamma}^n \quad (5.9)$$

$$\tau_0 : \text{Yield stress} \qquad k = \phi^{\frac{1}{m}} \qquad n = \frac{1}{m}$$

Observamos que si no existe “yield stress” ($\tau_0=0$) la ley se convierte en una exponencial idéntica a la vista para los termoplásticos.

5.2.3.- Ecuación WLF.-

Como sabemos la viscosidad varía con la temperatura. Williams, Landel y Ferry (WLF) [28] desarrollaron un método por el cual relacionaban la viscosidad a la temperatura deseada con respecto a la viscosidad a la temperatura estandar (T_s).

$$\text{Log} a_t = \text{Log} \frac{\eta(T)}{\eta(T_s)} = -\frac{C_1 \times (T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (5.10)$$

$$C_1 = -8.86 \quad C_2 = 101.6 \quad T_s = T_g + 50^\circ\text{C} \quad (T_g : \text{Temperatura de transición vítrea})$$

El criterio WLF es aceptable cuando se oscila sobre la temperatura de referencia $\pm 30^\circ\text{C}$.

Si lo que conocemos es la viscosidad a una T_0 (lo más habitual) en vez de T_s podemos hacer el siguiente cambio:

$$\text{Log} a_t = \text{Log} \frac{\eta(T)}{\eta(T_0)} = \text{Log} \left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_0)} \times \frac{\eta(T_s)}{\eta(T_0)} \right)$$

Con lo cual:

$$\text{Log} a_t = \frac{C_1 \times (T_0 - T_s)}{C_2 + (T_0 - T_s)} - \frac{C_1 \times (T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (5.11)$$

El factor de corrección at lo aplicaremos en los modelos de Carreau, exponencial y Herschel-Bulkley de tal manera que:

$$\eta(T) = a_t \times \eta(T_0) \quad (5.12)$$

Las ecuaciones quedan como sigue:

Carreau
$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{a_1(T) \times A}{(1 + a_1(T) \times B \times \dot{\gamma})^C} \quad (5.13)$$

Exponencial
$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_1 \times k \times (a_1 \times \dot{\gamma})^{n-1} \quad (5.14)$$

Herschel-Bulkley
$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_1 \times k \times (a_1 \times \dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (5.15)$$

6.- METODOLOGÍA GENERAL DE DISEÑO. PARÁMETROS A

CONSIDERAR.-

6.1.- Especificaciones de diseño previas.-

Sin duda alguna el correcto diseño de un cabezal de extrusión persigue como objetivo final el satisfacer una serie de especificaciones previas que hemos de considerar antes de iniciar cualquier análisis. Cuando hablamos de *especificaciones* nos referimos a todos aquellos requerimientos a cumplir por el producto fabricado tanto desde el punto de vista de su aplicación como de su producción.

Como ocurre en todo proceso de diseño el nivel de cumplimiento de las especificaciones de partida no siempre va a ser del 100% sino como en nuestro caso ocurre la completa satisfacción de unas va en detrimento de la satisfacción de otras. Tarea del diseñador es la de conseguir un compromiso óptimo entre todas ellas. Precisamente la metodología desarrollada con DIEPLAST va encaminada a facilitar este proceso complejo al tener que manejar muchos parámetros diferentes que están interrelacionados entre sí.

Por lo tanto lo primero que debemos hacer es definir lo que pretendemos conseguir, es decir, marcar las *especificaciones de diseño*. La dificultad aumenta aún más cuando nos damos cuenta que en un proceso de extrusión son varios los elementos que influyen en el cumplimiento o no de las especificaciones. Estos elementos los podemos agrupar de la siguiente forma:

- * Extrusora (principalmente el o los husillos)
- * Cabezal
- * Sistema de calibración
- * Sistema de enfriado
- * Sistema de arrastre

Nosotros nos centraremos en el diseño del cabezal para la consecución de las especificaciones pero sin olvidar que ciertamente pueden haber otros factores que pueden influir. Así por ejemplo un mal acabado superficial de un tubo puede ser debido al cabezal o también a un deficiente sistema de calibrado-enfriado.

Sin quererlo hemos solapado dos ideas bien diferenciadas, por un lado nos hemos referido a especificaciones del *producto* pero por otro lado hablamos de *diseño de cabezal*. ¿No implica esto que también debemos hablar de *especificaciones de diseño del cabezal* propiamente dicho?, evidentemente sí. Nos encontramos pues ante un caso típico de diseño de utillaje, matriz, molde que a su vez sirve para fabricar otro producto que es el objetivo final del proceso; pero sin olvidar que estamos ante un producto en sí mismo.

Sirva esta pequeña reflexión para distinguir dos grupos de especificaciones, unas que afectan al extrusado como producto y otras que afectan al cabezal también como producto. En el primer caso las hemos dividido en dos bloques, uno se refiere al costo productivo y el otro a la calidad del extrusado; en el segundo caso tratamos las especificaciones que afectan a la viabilidad técnico-económica del cabezal que es diseñado. Tanto en un caso como en otro son especificaciones que tenemos siempre que considerar.

Especificaciones referidas al extrusado desde el punto de vista de la producción

Si nos centramos exclusivamente en aspectos relacionados con el proceso de producción podemos tener en cuenta por un lado especificaciones de *costo* y por otro de *calidad*

Las especificaciones de *costo* (Fig. 6.1) son las siguientes:

a) Material. No todos los materiales son susceptibles de ser extrusionados en determinadas condiciones, con lo cual en la medida que el diseño del cabezal sea

adecuado podremos utilizar un material que económicamente sea viable y por supuesto aceptable para el uso del extrusado.

b) Producción. El cabezal influye directamente por ejemplo en la producción (ver 3.1), es decir en el tiempo (que es costo de operario y máquina), en el consumo energético.

Las especificaciones de calidad (Fig. 6.2) son:

a) Dimensiones del extrusado. El extrusado debe entrar dentro de unas tolerancias de acuerdo a su uso. El cabezal va a tener una especial importancia en este punto.

b) Estado superficial. Existen varios defectos superficiales producidos a consecuencia del cabezal y por supuesto de las condiciones de trabajo.

c) Resistencia mecánica del extrusado. Un inadecuado diseño del cabezal y punto de trabajo puede producir roturas en la continuidad del material que ocasionen fracturas durante su utilización. También puede ocurrir por un inadecuado diseño del distribuidor o difusor.

d) Degradación del material. Si por cualquier motivo obtenemos un extrusado con degradación de su masa tenemos un producto de mala calidad.

e) Estabilidad. Se ha de tener en cuenta que bien por efectos térmicos, químicos o mecánicos no se varíen de forma apreciable dentro de un límite las dimensiones principales del producto; por ejemplo un excesivo acortamiento en su longitud debido al calor ambiental conjuntamente con un alto nivel de tensiones internas.

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO TENIENDO EN CUENTA EL EXTRUSADO Y DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA PRODUCCIÓN

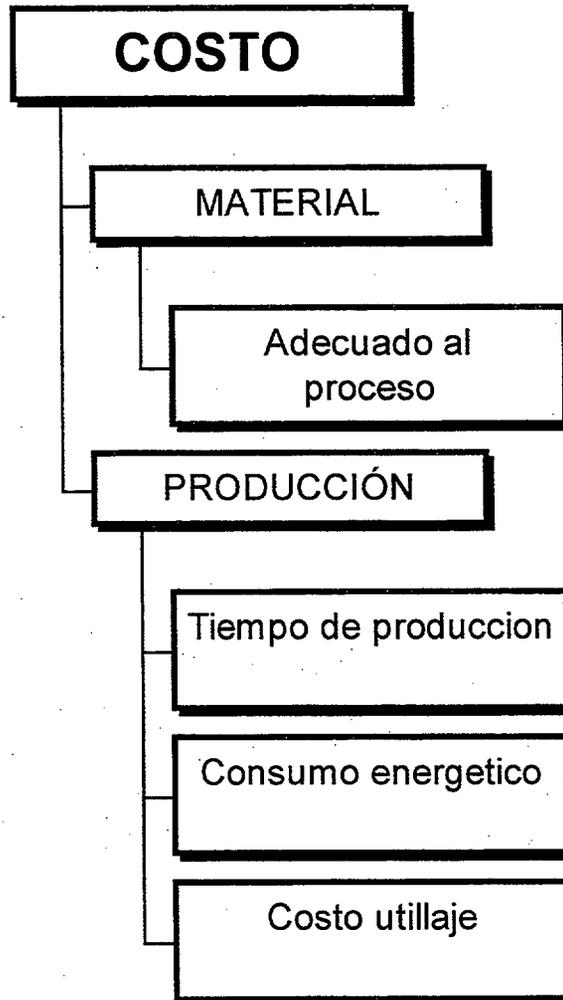


Fig. 6.1

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO TENIENDO EN CUENTA EL EXTRUSADO Y DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA PRODUCCIÓN

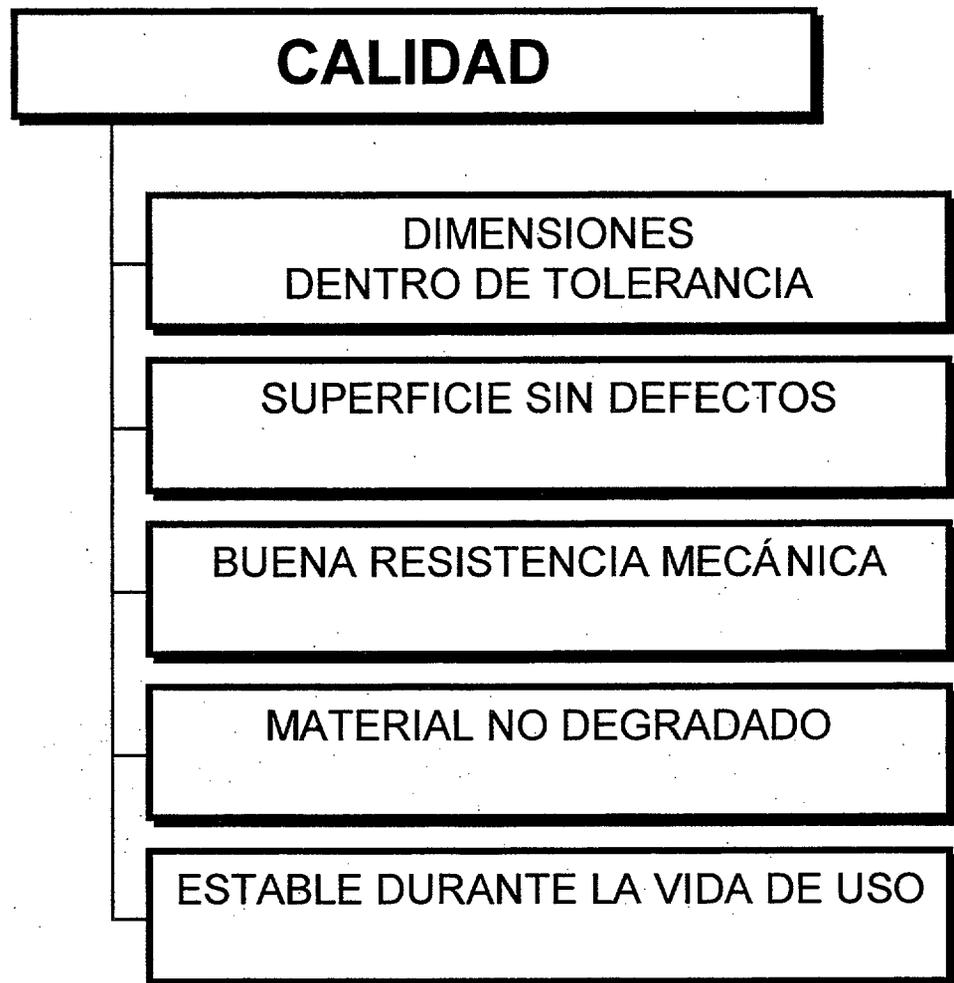


Fig. 6.2

Si atendemos al “cabezal” como objeto que en sí mismo requiere una serie de especificaciones independientes de las del extrusado en nuestro proceso de diseño tendremos en cuenta los siguientes aspectos (Fig. 6.3):

- a) Resistencia mecánica. El cabezal debe soportar los esfuerzos a los que va a ser sometido en todas las condiciones de trabajo.

- b) Diseño térmico. Una de las cualidades exigibles es que la uniformidad en la temperatura de la pared que está en contacto con el flujo sea la mayor posible. esto exige un correcto dimensionamiento de las paredes para conseguir una adecuada conductividad térmica.

- c) Fabricable. Sin duda alguna tanto a la hora de elegir la geometría del canal como la del resto del cabezal siempre tendremos en mente la posibilidad de mecanizarlo con los medios disponibles y a un costo no elevado.

- d) Posibilidad de ser modulable. La dinámica de la producción exige la mayor facilidad a la hora de cambiar de cabezal en la extrusora para cambiar de producto. Una de las formas de hacerlo es con cabezales modulares de tal manera que desmontando tan solo una parte podamos obtener otro diferente. Este hecho es realmente un gran condicionante porque trae consigo la utilización de una solución no óptima del todo.

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO TENIENDO EN CUENTA EL CABEZAL



Fig. 6.3

6.2.- Control de parámetros fundamentales.-

Aclarados los objetivos a cubrir nos centramos pues en uno de los aspectos importantes que forman parte del diseño del cabezal y es el diseño del *canal de flujo* . Antes de establecer unas líneas generales sobre que camino a seguir indicaremos que parámetros serán los que vamos a manejar para acercarnos al cumplimiento de las especificaciones marcadas en el apartado anterior.

En el análisis del canal de flujo existen multitud de parámetros que podemos calcular de forma más o menos aproximada, sin embargo para llegar a una solución coherente hay que seleccionar aquellos que influyen muy directamente en cada uno de los aspectos comentados. A continuación comentamos brevemente los más relevantes , unos lo serán porque servirán como elementos de limitación de unos máximos admisibles y otros serán útiles en sí mismos por su valor cuantitativo o cualitativo.

* **Temperatura (°C)**. Es un parámetro utilizado tanto como dato de partida como resultado. Como dato de partida influye lógicamente en el proceso y como resultado nos sirve por ejemplo para limitar un máximo de temperatura admisible para evitar degradación del material, indicándonos incluso si es necesario controlar la temperatura de ciertas partes del cabezal.

* **Producción (kg/h)**. Utilizable como dato de entrada y en combinación con la caída de presión nos sirve para construir la curva característica del cabezal, útil para averiguar el punto de trabajo en conjunción con la curva del husillo. Es fundamental para determinar la productividad de la extrusora.

* **Tiempo medio de residencia (s)**. Es el tiempo medio utilizado por una partícula de material en recorrer todo el interior del cabezal. Su valor nos indica por ejemplo el tiempo al que es sometido la partícula a una alta temperatura, que si es excesivo puede provocar la degradación (quemada) del material.

* **Presión (bar).** Parámetro importante para definir la productividad de la extrusora mediante el punto de trabajo (3.1) . Debemos limitar su valor además de por razones estrictamente resistentes del cabezal.

* **Velocidad de cizalla en la pared (s-1).** Es el típico parámetro que como criterio de entrada se ha de limitar a un valor máximo para evitar degradación del material. En el diseño de cabezales nos movemos en un rango entre 1 y 10000 [15] . Además tiene una relación directa con el hinchamiento a la salida del cabezal a causa del reagrupamiento del perfil de velocidades. Otro caso es su limitación para evitar algún tipo de inestabilidad en el flujo que rompa la adhesión a la pared (según Kleindienst para el HDPE no se debe superar los 30 s-1 en ninguna zona del canal)

* **Tensión de cortadura en la pared (bar).** Su valor al igual que ocurre con la velocidad de cizalla se utiliza como comprobación de que no supera un límite máximo. Así por ejemplo se suele indicar que si supera un máximo (0.1 Mpa LDPE) se puede producir el fenómeno de “melt fracture” donde se ocurre una discontinuidad interna que puede tomar diferentes formas (ondulaciones, rugosidades irregulares, etc). La evolución de la tensión de cortadura suele ir bastante en paralelo con la velocidad de cizalla como veremos en los gráficos resultantes de los cálculos aplicados a diferentes casos.

* **Factor de hinchamiento.** Aunque es el factor más difícil de estimar nos sirve para conocer el grado de deformación existente a la salida del cabezal (ver apartado 11.1), lo que nos permite saber al menos cualitativamente si nos acercamos o nos alejamos de las dimensiones deseadas para el extrusado independientemente del posterior proceso de calibrado.

6.3.- Proceso general de diseño hasta converger a una solución válida.-

Con el objetivo claro de las especificaciones de diseño y herramientas de cálculo potentes para determinar parámetros básicos nos queda por definir de qué forma articular una metodología para diseñar un cabezal de una forma sencilla y sin invertir un tiempo excesivo.

Una de las mayores aportaciones del programa “DIEPLAST” ha sido justamente plantear un método de trabajo que aglutine la experiencia y modelos desarrollados en la bibliografía para establecer unos criterios básicos que ayuden al diseñador. Ello debido a la gran cantidad de datos y resultados que se pueden manejar, lo que puede llegar a ser muy engorroso a la hora de tomar decisiones. Un programa de diseño no solo se debe limitar a calcular sino también a establecer criterios de decisión que retroalimenten un proceso en si mismo complejo como es el de *diseñar*.

Se han desarrollado principalmente tres métodos de trabajo (aunque en algunos casos se solapan). Estos métodos que llamaremos *criterios* se diferencian principalmente en los datos de partida y en los objetivos que se pretenden. No obstante son tres maneras de trabajar que en la práctica resultan bastante complementarias ya que en muchos casos plantean diferentes puntos de vista a la hora de afrontar un mismo problema. En los gráficos que se mostrarán posteriormente vemos de forma esquemática como se opera con cada uno de ellos.

Antes de pasar a su explicación comentar que no se han incluido aspectos de diseño mecánico y térmico del cabezal al quedar fuera del alcance de este trabajo pero sí serían perfectamente asumibles por los métodos planteados. La viabilidad técnica del cabezal se centra pues en cuestiones puramente geométricas y de montaje.

Criterio 1.- Análisis para unas condiciones de trabajo puntuales.

Con este criterio se estudia una solución concreta para unas condiciones de trabajo, es decir situándonos en un punto de la curva característica del cabezal (definida

por la geometría, temperaturas de trabajo y material seleccionado) con una producción (Kg/h) que es un dato de entrada. A partir de aquí obtenemos todos los parámetros posibles y de éstos sacamos los *fundamentales* para sacar conclusiones, es decir caída de presión, velocidad de cizalla máxima, tensión de cortadura máxima, temperatura máxima, tiempo medio de residencia y factores de hinchamiento (swell). El proceso de iteración consiste en ir probando diferentes geometrías, con diferentes producciones, con diferentes temperaturas de masa y pared e incluso con diferentes materiales hasta que los valores *fundamentales* tengan valores aceptables para nosotros, es decir, que no queden por encima o por debajo de unos límites que establecemos.

Este criterio, al centrarse en un punto concreto es el que permite obtener un estudio completo y pormenorizado de todos los parámetros y ver la sensibilidad de estos cambiando las diferentes variables de entrada individualmente o conjuntamente. Al tratarse de una opción de análisis nos permite su utilización fuera del ámbito de diseño, donde por ejemplo pretendemos estudiar un cabezal concreto y trabajando en unas condiciones determinadas.

Criterio 2.- Obtención del área de trabajo posible.

Este criterio estaría a mitad de camino de lo que sería un proceso de *análisis* (criterio 1) y un proceso de *síntesis*. Decimos esto porque se nos ofrece una amplia gama de posibilidades que podemos elegir. La diferencia principal con el caso anterior estriba en que de entrada establecemos unas restricciones en forma de límites superior e inferior de los parámetros fundamentales. El sistema como respuesta nos ofrece lo que hemos llamado *área de trabajo* que no es otra cosa que acotarnos tanto por arriba como por abajo en la curva característica del cabezal donde podemos movernos para cumplir las restricciones. Por lo tanto en este caso la producción no es una entrada sino una salida en forma de intervalo.

El estudio ya no se plantea para un punto sino para una gama de puntos que uno a uno son analizados para ser posteriormente resumidos en los parámetros fundamentales. Conocida el área de trabajo y en conjunción con las curvas

características del husillo podemos establecer los puntos más óptimos en función de las necesidades de producción y de las posibilidades de la propia extrusora. Eso sí los parámetros fundamentales solo se optimizarían desde un punto de vista de no rebasar sus límites; tengamos en cuenta que cumplir todas las restricciones a la vez igual no siempre es posible y la única manera solo sea bajar esas restricciones o modificar todo el resto de variables como vemos en el gráfico.

Criterio 3.- Síntesis de la geometría a partir de parámetros de entrada.

Este sí es un auténtico proceso de síntesis, lo que pasa es que va a estar limitado a pocos parámetros de entrada y la salida será la geometría. Significa que al contrario que en los criterios anteriores la geometría ya no se define a priori por el usuario sino que es un resultado prácticamente automático. En DIEPLAST esta forma de operar se ha planteado en el diseño de algún tipo de distribuidor como es el “coathanger” donde para una caída depresión dada, unas temperaturas de masa y pared, una producción y un material el programa obtiene la geometría que se adapta a esas restricciones.

No hay que confundir esta opción con la también incluida en DIEPLAST y que consiste en *dirigir* al diseñador cuando define la geometría, diseñando de forma semiautomática algunas partes del cabezal con un criterio basado exclusivamente en la experiencia existente en la industria.

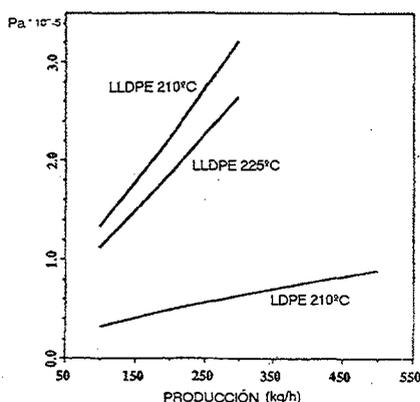


Fig. 6.4.- Valores críticos de tensión de cortadura para evitar rotura de masa (melt- fracture).

CRITERIO 1. ANÁLISIS PARA UNAS CONDICIONES DE TRABAJO PUNTUALES

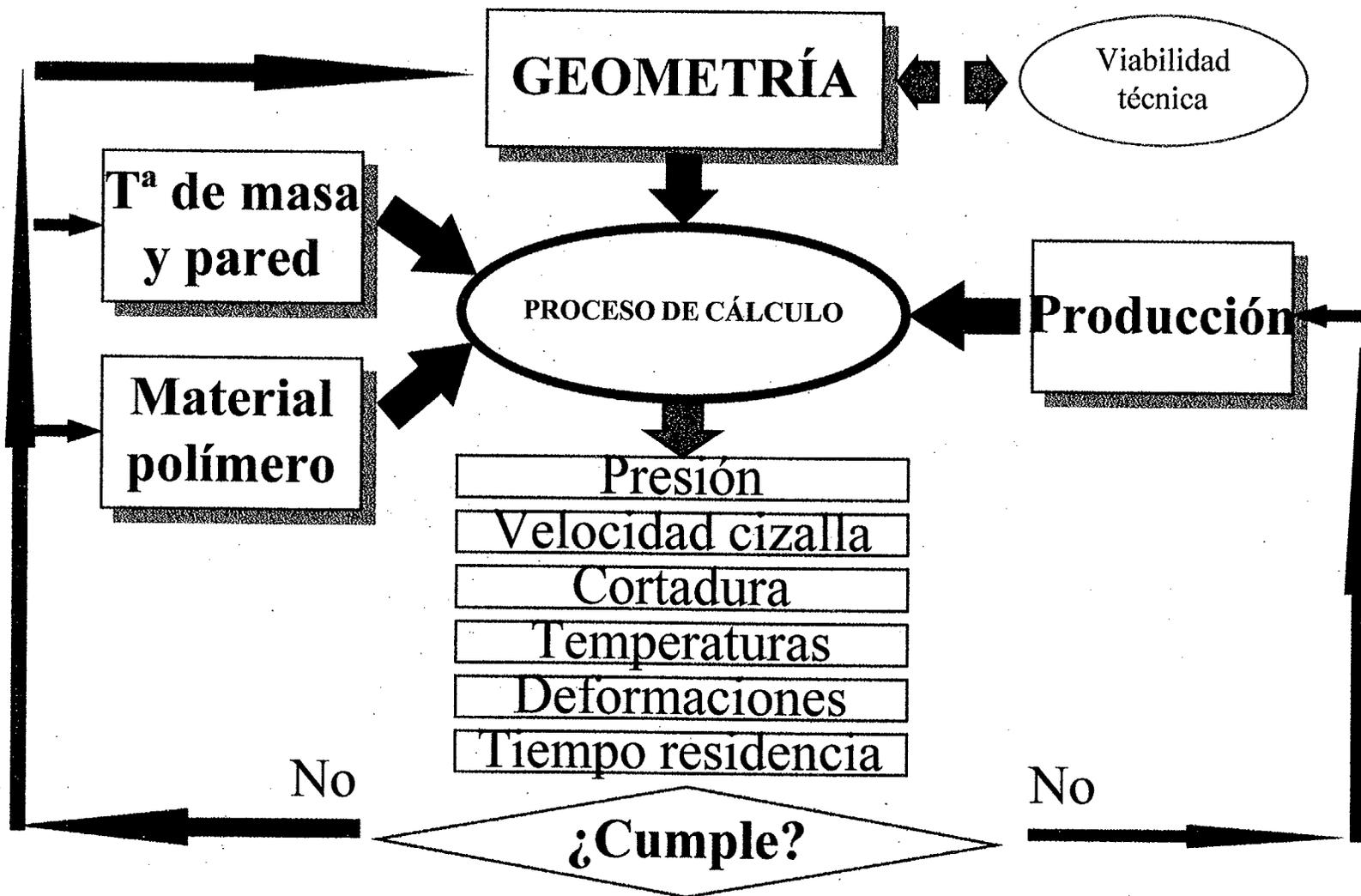


Fig. 6.5.- Criterio 1

CRITERIO 2. OBTENCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO POSIBLE

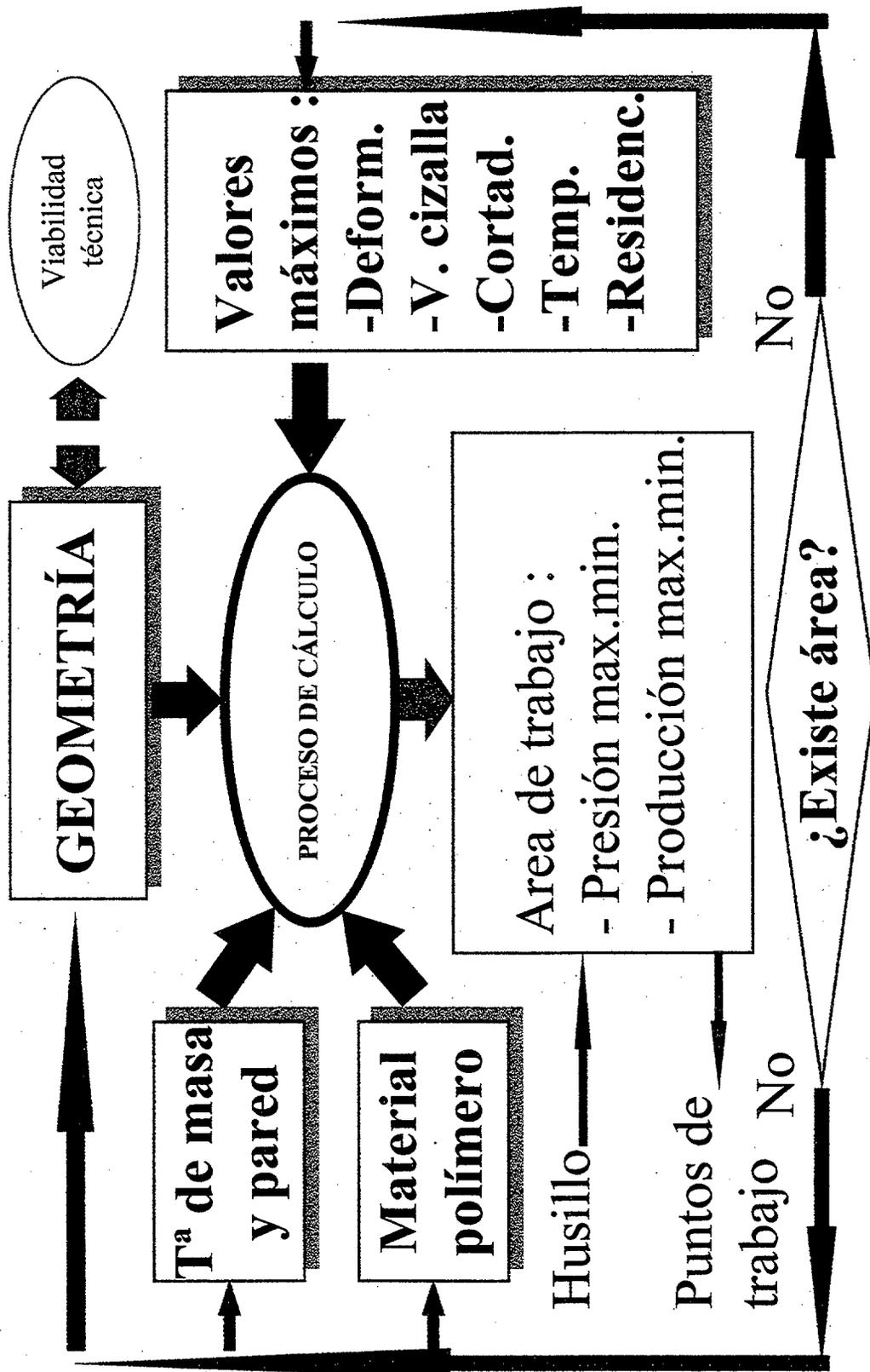


Fig. 6.6.- Criterio 2

CRITERIO 3. SÍNTESIS DE LA GEOMETRÍA A PARTIR DE PARÁMETROS DE ENTRADA

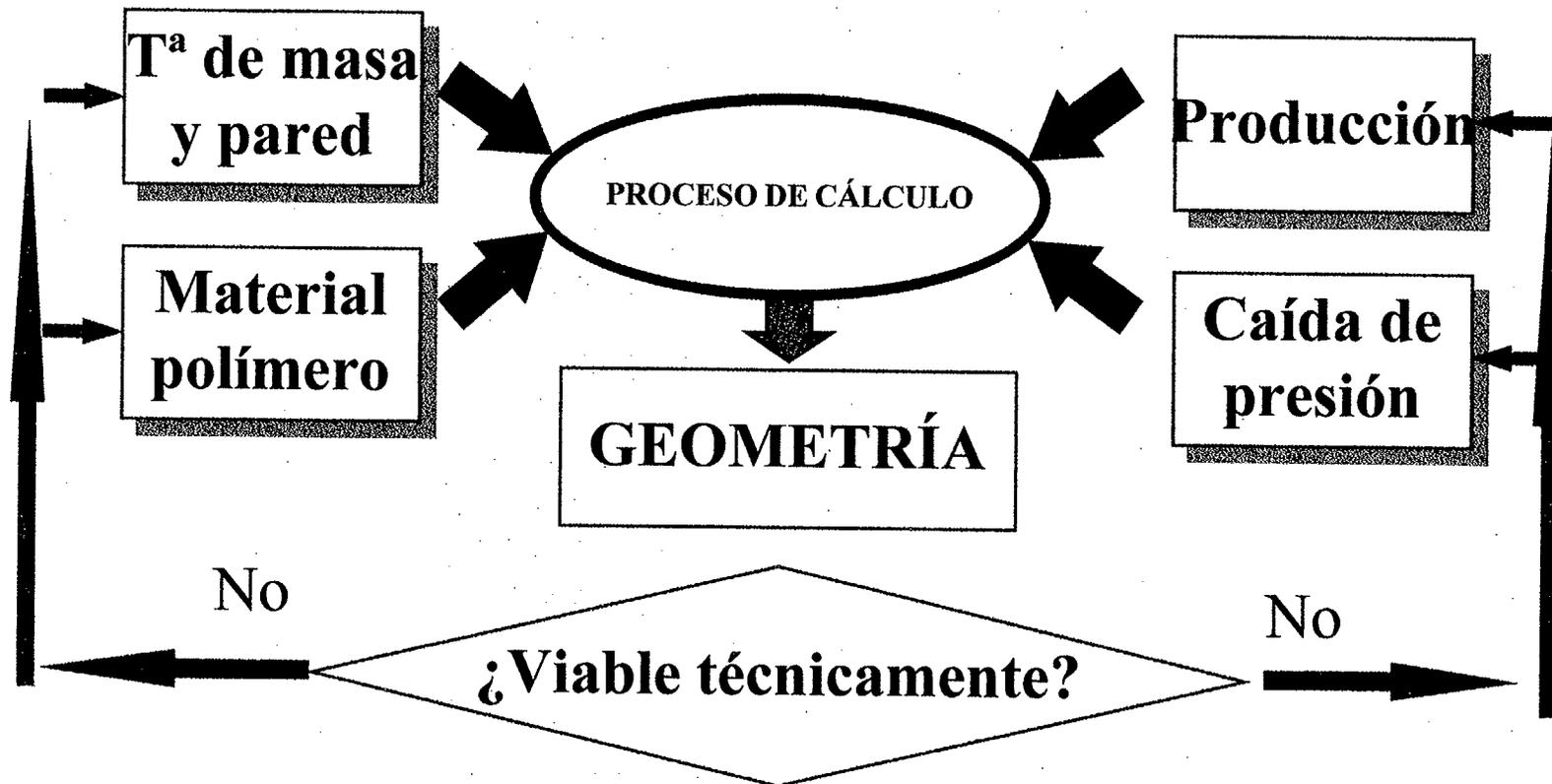


Fig. 6.7.- Criterio 3

7.- ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FLUJO APLICADAS A LA EXTRUSIÓN.-

7.1.- Ecuaciones fundamentales.-

Las ecuaciones básicas para el tratamiento del proceso de flujo son la ecuación de *continuidad*, de *momento* y *energía*. Además consideraremos el comportamiento reológico del material y la ley de Fourier en la hipótesis de suponer variación de temperatura.

A continuación exponemos las expresiones genéricas de las ecuaciones principales para posteriormente establecer las hipótesis simplificativas tenidas en cuenta en este trabajo.

* *Ecuación de continuidad* [29,30,15,31]

Para un diferencial de volumen:

Masa almacenada por unidad de tiempo = Masa entrante por unidad de tiempo - Masa saliente por unidad de tiempo

De forma simbólica:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{V}) \quad (7.1)$$

Para fluido incompresible: $\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (7.2)$

* *Ecuación de momento* [29,30,15,31]

Cambio en el momento por unidad de tiempo = Momento entrante por unidad de tiempo - Momento saliente por unidad de tiempo + Fuerzas sobre el sistema

$$\rho \times \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P - \nabla \tau + \rho \times \vec{g} \quad (7.3)$$

* *Ecuación de energía* [29,30,15,31]

$$\rho \times \frac{D\vec{V}}{Dt} = \underset{1}{-\nabla q} - \underset{2}{P} \times (\underset{3}{\nabla \vec{V}}) - (\underset{4}{\tau} \times \nabla \vec{V}) + \underset{5}{\phi} + \underset{6}{G} \quad (7.4)$$

- 1: Cambio de energía interna por unidad de tiempo y volumen
- 2: Cambio de energía por unidad de tiempo y volumen debido a conducción de calor
- 3: Porción recuperable del trabajo por unidad de tiempo y volumen debido a compresión
- 4: Porción no recuperable del trabajo por unidad de tiempo y volumen por disipación de calor viscoso
- 5: Cambio en la energía por unidad de tiempo y volumen debido a reacciones químicas
- 6: Trabajo por unidad de tiempo y volumen debido a fuerzas gravitatorias

7.2.- Hipótesis simplificativas y condiciones de contorno.-

Lógicamente hemos de plantear una serie de restricciones y condiciones de contorno para simplificar al máximo el conjunto de ecuaciones anteriores. Las que tomaremos son las que mencionamos a continuación:

- 1.- Se considera que el flujo es laminar y estacionario . Esto se considera como válido en procesos de extrusión continua. En extrusión-soplado esta hipótesis es más discutible.
- 2.- Las fuerzas de inercia y gravitacionales pueden ser despreciadas en comparación a las fuerzas de fricción y presión. Las fuerzas gravitacionales pueden tener su importancia en el caso de extrusión-soplado.
- 3.- No consideramos el fenómeno de “Wall Slip” y se tomará como cero el valor de la velocidad del fluido que esta en contacto con la pared del canal.
- 4.- Aprovecharemos la simetría para simplificar las ecuaciones.
- 5.- El gradiente de velocidad en la dirección del flujo es mucho mas pequeño que en la dirección transversal.
- 6.- Gradiente de presiones constante en la sección transversal del canal. Esto significa no considerar el efecto de las tensiones normales si fuese necesario.
- 7.- El fluido es completamente hidrodinámico en todas las secciones. Los gradientes de temperatura y velocidad en la dirección de flujo son tan pequeños que la tensión de cizalladura puede ser expresada en términos de viscosidad correspondiente a la temperatura y gradiente de velocidad locales.
- 8.- El calor por convección en la dirección del flujo es mayor que el calor transferido por conducción.
- 9.- El calor transmitido en la dirección perpendicular a la dirección del flujo es exclusivamente por conducción.
- 10.- Se considera que la densidad es constante (fluido incompresible), al igual que la conductividad y difusividad térmica.

Otras condiciones de contorno que se suelen tomar son:

11.- En el flujo de calor colada-pared del cabezal podemos considerar lo siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial y} \text{ pared} = B_i * \frac{T_r - T_w}{S}$$

$$B_i = \frac{K * S}{\lambda}$$

Donde:

λ : Conductividad térmica

T_w : Temperatura de la colada en la pared

T_r : Temperatura de un punto del cabezal

K : Coeficiente de transmisión de calor para la pared entre la capa de contacto de la colada/cabezal y el punto de temperatura T_r a distancia S .

B_i : Número de Biot.

El número de Biot caracteriza la transferencia de calor a través de la pared. para cabezales de extrusión varía de 1 a 100. esto solo afecta al flujo de calor perpendicular a la pared.

12.- La temperatura de la colada en la pared es igual a la temperatura de la pared.

$T_r = T_w$. esto se refiere a una pared isotérmica ($B_i \rightarrow \infty$). En cualquier caso con un número de Biot =100 podemos considerarla isotérmica.

13.- Se considera la pared del canal adiabática y toma la temperatura de la colada mas cercana a ella.

8.- MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS EN GEOMETRÍAS SIMPLES Y CONDICIONES ISOTÉRMICAS. VISCOSIDAD REPRESENTATIVA.-

8.1.- Introducción.-

Si partimos de las ecuaciones genéricas planteadas en el punto 7 y aplicamos las hipótesis simplificadoras (ver punto 9 y 10) observamos que para un determinado tipo de geometrías simples las ecuaciones se reducen enormemente. Si además tenemos en cuenta la condición de estado isotérmico y adiabático en las paredes podemos incluso llegar a obtener expresiones de tipo analítico fáciles de aplicar. No obstante estas expresiones tienen sus limitaciones, una de las cuales es la de suponer que la viscosidad es constante (flujo newtoniano).

Las geometrías que se permiten esta simplificación son:

- Geometrías circulares y anulares (Fig. 8.1)
- Geometrías rectangulares tipo ranura $B \gg H$ (Fig 8.1)

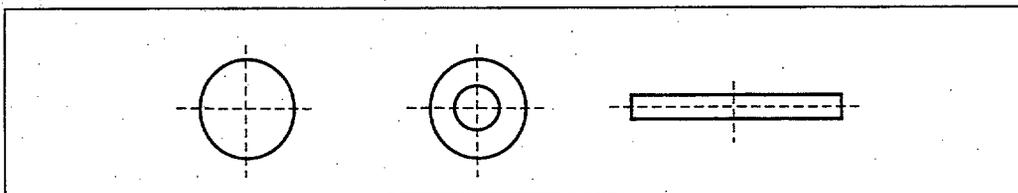


Fig. 8.1.- Geometrías simples. a) Circular b) Anular c) Ranura

Existen autores que las han desarrollado para otras geometrías simples (elípticas, triangulares, etc). Los parámetros que nos permiten calcular estas expresiones son:

- Perfil de velocidades (v mm/s)
- Perfil de velocidades de cizalla ($\dot{\gamma}$ s⁻¹)
- Perfil de tensiones de cortadura (τ Pascal)
- Caída de presión por metro lineal ($\Delta P/l$ bar/mm)

Los modelos reológicos que permiten este desarrollo analítico son:

- Flujo newtoniano
- Ley exponencial (con limitaciones)

Aunque la dificultad para llegar a las expresiones en el caso de la ley exponencial es mayor en la referencia [18] podemos ver un completo resumen de formulas matemáticas bastante completo aplicado a geometrías de revolución, método con el cual compararemos resultados obtenidos con DIEPLAST.

Utilizando expresiones de tipo analítico el problema se reduce a dividir el canal en tramos y aplicar las ecuaciones que correspondan a la geometría. Como referencia decir que el error cometido por utilizar este tipo de métodos oscila entre un 10 y un 30% [15].

En cualquier caso como veremos en el punto 8.2 en el llamado “Método Analítico de DIEPLAST” se ha optado por el “Método de las Viscosidades Representativas” donde el valor de η no es cualquier valor sino uno muy particular y que utilizamos en expresiones analíticas.

Otro aspecto a tener en cuenta en el desarrollo del “Método analítico de DIEPLAST” es considerar que en el caso de canales de sección variable se divide éste en tramos pequeños de sección recta (Fig. 8.2)

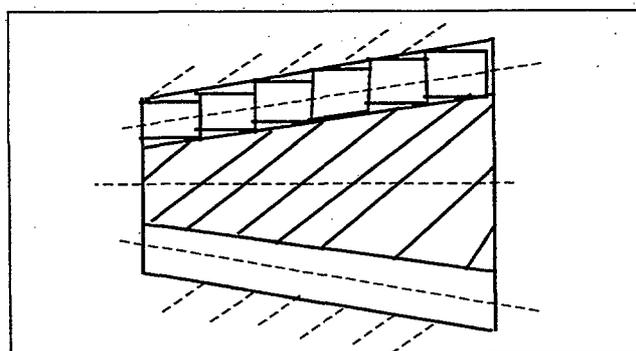


Fig. 8.2.- Canales de sección variable

Como conclusión final a esta introducción decir que la razón principal de dar la opción de cálculo analítico además del método numérico es proporcionar una

herramienta “rápida” y útil en el prediseño del cabezal, e incluso en algunos casos proporcionaría una información ya suficiente.

8.2.- Método de las viscosidades representativas (M.V.R.).-

El concepto de “viscosidad representativa” fué introducido por primera vez por Chmiel y Schümmer [15,32]. Si por ejemplo en un reómetro tenemos un flujo a través de un capilar representando la velocidad de cizalla según expresiones analíticas newtonianas y la velocidad de cizalla como un fluido no newtoniano (Fig. 8.3) vemos que se cortan en un punto. Pues bien la velocidad de cizalla de dicho punto es la que tomaremos como la más representativa ($\bar{\gamma}$) y que a su vez dará lugar a la viscosidad representativa $\bar{\eta} = \eta(\bar{\gamma})$.

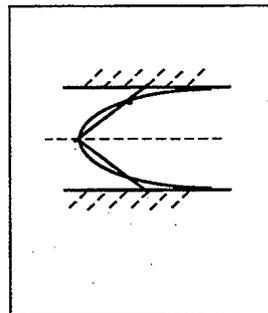


Fig. 8.3.- Punto representativo

Podemos definir:

$$e_o = \frac{r_s}{R} \quad \text{Para sección circular} \quad (8.1)$$

$$e_{\#} = \frac{h_s}{H/2} \quad \text{Para sección rectangular tipo ranura} \quad (8.2)$$

Según Wortberg [33] y de acuerdo al rango de m (Ostwald-deWaele) entre 2 y 4, que corresponde a la mayoría de las aplicaciones prácticas, los valores de e_o y $e_{\#}$

pueden considerarse aproximadamente constantes, con un error respectivamente $< 1.8\%$ y $< 2.5\%$.

$$e_o \approx 0.815 \quad e_{\#} \approx 0.772 \quad (8.3)$$

Por lo tanto la velocidad de cizalla representativa será:

$$\bar{\gamma} = \gamma_s \times e \quad \gamma_s: \text{Velocidad de cizalla aparente (newtoniana)} \quad (8.4)$$

A partir de estos valores podemos conocer la viscosidad representativa a partir del modelo elegido (Carreau, Ostwald-deWaele, etc)

$$\bar{\eta} = \eta(\bar{\gamma}) \quad (8.5)$$

$$\bar{\tau} = \eta(\bar{\gamma}) \times \bar{\gamma} \quad (8.6)$$

Es un método sencillo de aplicar ya que partiendo de expresiones newtonianas simples e introduciendo el factor “e” obtenemos los diferentes parámetros buscados. En el apartado 8.3 vemos un resumen de las ecuaciones.

Viscosidad representativa en elastómeros

No existe mucha diferencia en este punto entre el caso de los termoplásticos y el caso de los elastómeros. Recordando la expresión de Herschel-Bulkley (5.9) y según el intervalo de n en que nos movamos:

$$\begin{aligned} e_o &= 0.82(0.2 < n < 0.6) \\ e_{\#} &= 0.78(0.2 < n < 0.6) \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$\text{Esto es para } \frac{\tau_o}{\tau_w} < 0.33 \quad \tau_o: \text{Yield stress} \quad (8.8)$$

τ_w : Cortadura en pared

Los pasos a dar son:

- a) Cálculo de $\bar{\gamma}$
- b) Cálculo de $\eta(\bar{\gamma})$

$$\bar{\eta} = \frac{\tau_0}{\bar{\gamma}} + k \times \bar{\gamma}^{n-1} \quad (8.9)$$

8.3.- Resumen de las expresiones analíticas utilizadas en “DIEPLAST” para el cálculo de los canales.-

Una vez ya centrados en el “Método de las viscosidades representativas” veamos en la Tabla 8.1 las ecuaciones utilizadas.

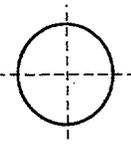
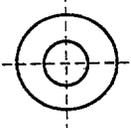
| GEOMETRÍA | VELOCIDAD DE CIZALLA REPRESENTATIVA | TENSION DE CORTADURA | CAÍDA DE PRESIÓN POR UNIDAD DE LONGITUD |
|---|---|---|---|
| Circular  | $\bar{\gamma} = \frac{4 \times \dot{V}}{\pi \times R^3} \times e_0$ | $\tau = \frac{\Delta P}{2 \times L} \times r$ | $\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \times \bar{\eta} \times \dot{V}}{\pi \times R^4}$ |
| Anular  | $\bar{\gamma} = \frac{\dot{V}}{(R_a^2 - R_i^2) \times \bar{R}}$ $\bar{R} = R_a \times \left(1 + k^2 + \frac{1 - k^2}{Lnk}\right)^{1/2}$ $k = \frac{R_i}{R_a}$ | $\tau = \frac{R}{2} \times \frac{\Delta P}{L} \times \left(\left(\frac{r}{R}\right) - \frac{1 - k^2}{2 \times Ln(1/k)} \times \frac{R}{r} \right)$ $k = \frac{R_i}{R_a}$ | $\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \times \bar{\eta} \times \dot{V}}{\pi \times (R_a^2 - R_i^2) \times \bar{R}}$ $\bar{R} = R_a \times \left(1 + k^2 + \frac{1 - k^2}{Lnk}\right)^{1/2}$ $k = \frac{R_i}{R_a}$ |
| Rectangular ranura  | $\bar{\gamma} = \frac{6 \times \dot{V}}{B \times H^2} \times e_{\#}$ | $\tau = \frac{\Delta P}{L} \times X$ | $\frac{\Delta P}{L} = \frac{12 \times \bar{\eta} \times \dot{V}}{B \times H^3}$ |

Tabla 8.1.- Resumen de expresiones analíticas utilizadas en el M.V.R.

9.- MÉTODO NUMÉRICO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS EN LOS CANALES DE FLUJO.-

9.1.- Simplificación de las ecuaciones fundamentales.-

Teniendo en cuenta lo expuesto en el punto 7.2 las ecuaciones de continuidad y momento combinadas quedan como sigue:

* Expresión en coordenadas cilíndricas (z es la dirección axial):

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\tau r}{r} + \frac{\partial \tau r}{\partial r}$$

$$\tau r = -\eta^* \frac{\partial V_z}{\partial r}$$
(9.1)

* Expresión en coordenadas cartesianas (x es la dirección axial):

$$\frac{\partial P}{\partial X} = -\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial Y}$$

$$\tau_{yx} = -\eta^* \frac{dV_x}{dY}$$
(9.2)

La ecuación de energía queda :

* Coordenadas cilíndricas :

$$\rho^* C_p^* V_z^* \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{r}^* \frac{\partial}{\partial r} \left(r^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \eta^* \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2$$
(9.3)

* Coordenadas cartesianas:

$$\rho^* C_p^* V_x^* \frac{\partial T}{\partial X} = \lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \eta^* \left(\frac{\partial V_x}{\partial Y} \right)^2$$
(9.4)

9.2.- Expresiones integrales (Velocidad, presión por unidad lineal).-

Si a las expresiones 9.1 y 9.2 les aplicamos las condiciones de contorno de acuerdo a la geometría que se trate obtenemos las siguientes expresiones integrales:

* Geometría circular (Radio R):

Velocidad

$$V_z(r) = \frac{\partial P}{\partial z} * \int_r^R \frac{r}{2 * \eta} * dr \quad (9.5)$$

Presión

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\dot{V}}{2 * \pi * \int_0^R r * \left[\int_r^R \frac{r}{2 * \eta(r)} * dr \right] * dr} \quad (9.6)$$

* Geometría anular (Radio Ri interior R0 exterior):

Velocidad

$$V_z(r) = \frac{\partial P}{\partial z} * \int_r^{R_0} \frac{1}{2 * \eta} * \left[r - \frac{\Gamma^2 * R_0^2}{r} \right] * dr \quad (9.7)$$

$$\Gamma^2 = \frac{1 - k^2}{2 * (Ln1 / K)} \quad k = R_i / R_0$$

Presión

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\dot{V}}{2 * \pi * \int_{R_i}^{R_0} r * \left[\int_r^{R_0} \frac{\left[r - \frac{\Gamma^2 * R_0^2}{r} \right]}{2 * \eta(r)} * dr \right] * dr} \quad (9.8)$$

* Geometría rectangular tipo ranura (Ancho B espesor H) :

Velocidad

$$V_x(y) = \frac{\partial P}{\partial x} * \int_y^{H/2} \frac{y}{\eta(y)} * dy \quad (9.9)$$

Presión

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\dot{V}}{2 * B * \int_0^{H/2} \left[\int_y^{H/2} \frac{y}{\eta(y)} * dy \right] * dy} \quad (9.10)$$

Vemos como las ecuaciones de energía y velocidad están acopladas a través de la viscosidad al depender ésta de la temperatura. La manera elegida para desacoplar ambas se verá en el punto 9.5.

9.3.- Discretización de las ecuaciones integrales.-

Dividiendo el canal de flujo en diferentes capas n y secciones k (total N_t capas, ver apartado 9.4) y desarrollando las diferentes integrales como sigue [35]:

$$\int_A^B f(x) * dx = \sum_{n=N}^M 0.5 * [f(x)_n + f(x)_{n+1}] * \Delta x \tag{9.11}$$

tenemos que para las diferentes geometrías las expresiones integrales nos quedan como:

a) Flujo circular

$$V_z(N) = \frac{\partial P}{\partial z} * \sum_{n=N}^{NT} 0.5 * \left[\frac{r(n)}{2 * \eta(n)} + \frac{r(n+1)}{2 * \eta(n+1)} \right] * \Delta r = \frac{\partial P}{\partial z} * SA1(N)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{Q}{2 * \pi * \sum_{n=1}^{NT} \frac{r(n) * SA1(n) + r(n+1) * SA1(n+1)}{2} * \Delta r} = \frac{Q}{2 * \pi * SB1(K)} \tag{9.12}$$

b) Flujo anular

$$V_z(N) = \frac{\partial P}{\partial z} * \sum 0.5 * \left[\frac{r(n) - \frac{\Gamma^2 * Ro^2}{r(n)}}{2 * \eta(n)} + \frac{r(n+1) - \frac{\Gamma^2 * Ro^2}{r(n+1)}}{2 * \eta(n+1)} \right] * \Delta r = \frac{\partial P}{\partial z} * SA2(N)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{Q}{2 * \pi * \sum_{n=1}^{NT} \left[\frac{r(n) * SA2(n) + r(n+1) * SA2(n+1)}{2} \right] * \Delta r} = \frac{Q}{2 * \pi * SB2(K)} \tag{9.13}$$

c) Rectangular

$$V_x(N) = \frac{\mathcal{P}}{\partial x} * \sum_{n=N}^{NT} 0.5 * \left[\frac{y(n)}{\eta(n)} + \frac{y(n+1)}{\eta(n+1)} \right] * \Delta y = \frac{\mathcal{P}}{\partial x} * SA1(N)$$

(9.14)

$$\frac{\mathcal{P}}{\partial x} = \frac{Q}{2 * B * \sum_{n=1}^{NT} \frac{SA1(n) + SA1(n+1)}{2} * \Delta y} = \frac{Q}{2 * \Pi * SB1(K)}$$

9.4.- Aplicación del método de diferencias finitas para la discretización y resolución de la ecuación de energía.-

Si discretizamos todo el canal de flujo en diferentes capas n desde $n=1$ hasta $n=Nt$ y en diferentes secciones k obtenemos un mallado que en el caso de geometrías de revolución es similar al mostrado en la Fig. 9.1.

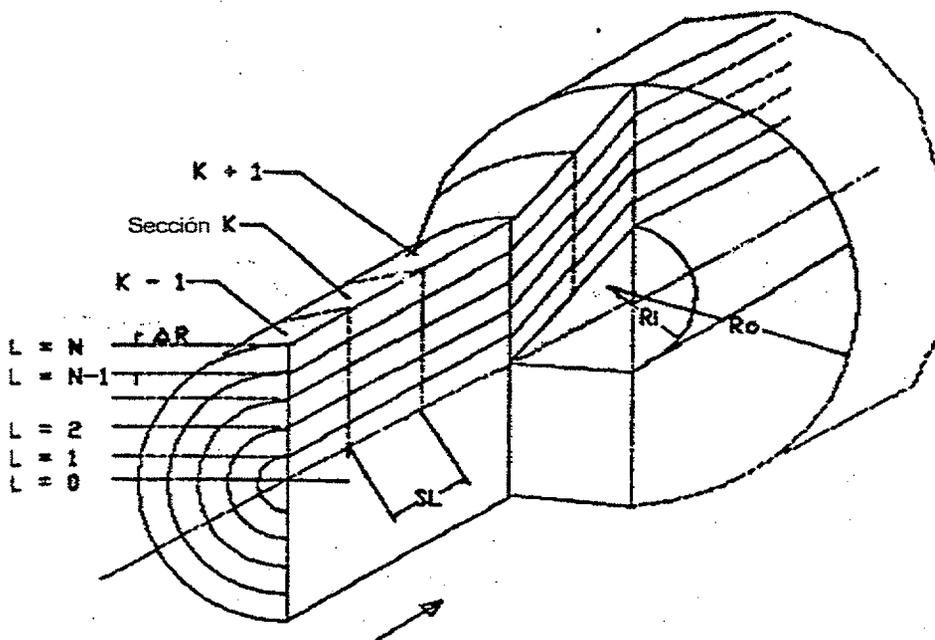


Fig. 9.1.- Discretización del canal de flujo en geometrías de revolución

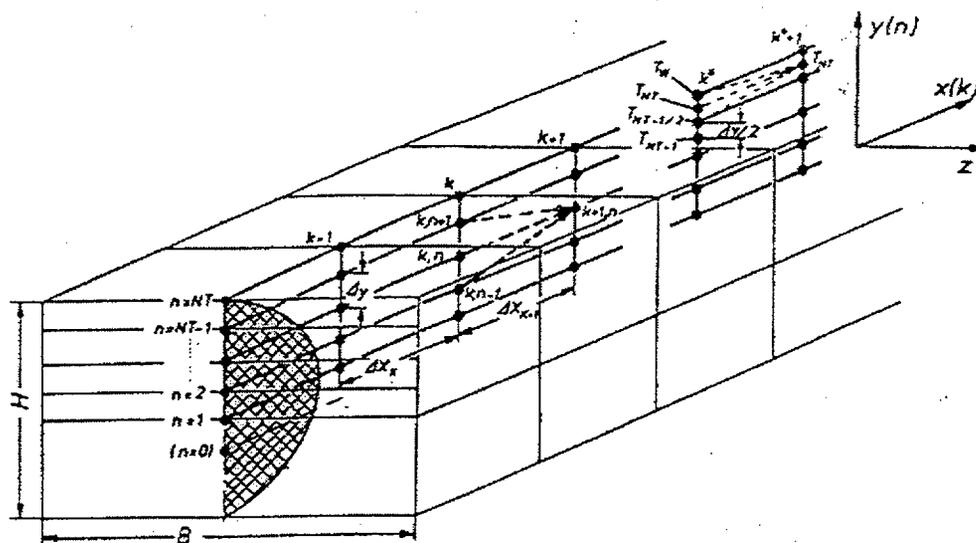


Fig.9.2.- Discretización del canal de flujo en geometrías tipo ranura

Para aplicar el método de Diferencias Finitas paso a paso (MDF) es necesario discretizar las ecuaciones diferenciales. Observando la ecuación de la energía en coordenadas cilíndricas (9.3) las discretizaciones elegidas para los elementos diferenciales son las siguientes [15,2,35,31]:

* *Geometrías de revolución*

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{T_{k+1,n} - T_{k,n}}{\Delta z} \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{T_{k,n+1} - T_{k,n-1}}{2 * \Delta r} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= \frac{T_{k,n-1} - 2 * T_{k,n} + T_{k,n+1}}{\Delta r^2} \\ \frac{\partial V_z}{\partial r} &= \frac{V_{k,n} - V_{k,n+1}}{\Delta r} \end{aligned} \tag{9.15}$$

Sustituyendo en la ecuación 9.3, reagrupando términos y despejando la temperatura nos queda:

$$\begin{aligned} T_{k+1,n} = T_{k,n} + \frac{\lambda * \Delta z}{\rho * C_p * \bar{V}_z} * \left[\frac{T_{k,n+1} - T_{k,n-1}}{2 * \Delta r * r} + \frac{T_{k,n-1} - 2 * T_{k,n} + T_{k,n+1}}{\Delta r^2} \right] + \\ + \frac{\eta(n) * \Delta z}{\rho * C_p * \bar{V}_z} * \left[\frac{V_{k,n} - V_{k,n+1}}{\Delta r} \right]^2 \end{aligned} \tag{9.16}$$

Donde podemos tomar $\bar{V}_z = \frac{V_{k,n} + V_{k+1,n}}{2}$

Del mismo modo a partir de la ecuación 9.4 obtenemos la expresión para geometrías tipo ranura:

* Geometrías tipo ranura

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{k+1,n} - T_{k,n}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{k,n-1} - 2 * T_{k,n} + T_{k,n+1}}{\Delta y^2} \quad (9.17)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial r} = \frac{V_{k,n} - V_{k,n+1}}{\Delta y}$$

Sustituyendo en la ecuación 9.4, reagrupando términos y despejando la temperatura nos queda:

$$T_{k+1,n} = T_{k,n} + \frac{\lambda * \Delta x}{\rho * C_p * \bar{V}_x} * \left[\frac{T_{k,n-1} - 2 * T_{k,n} + T_{k,n+1}}{\Delta y^2} \right] +$$

$$+ \frac{\eta(n) * \Delta x}{\rho * C_p * \bar{V}_x} * \left[\frac{V_{k,n} - V_{k,n+1}}{\Delta y} \right]^2 \quad (9.18)$$

Donde podemos tomar $\bar{V}_x = \frac{V_{k,n} + V_{k+1,n}}{2}$

Tanto en un caso como en otro vemos como podemos calcular la temperatura en el punto k+1 a partir de los puntos situados en la sección k.

9.5.- Desacoplamiento de la ecuación de energía y momento.-

Tal como hemos observado para calcular el campo de temperaturas hemos de conocer el campo de velocidades. Pero a su vez para determinar el campo de velocidades debemos conocer el perfil de viscosidades que depende de la temperatura.

El método a seguir implica suponer como punto de partida que la temperatura a la entrada del cabezal es conocida igual que la temperatura de la pared (T_w).

Se ha desarrollado una metodología para poder determinar el campo de velocidades, temperaturas, gradientes, viscosidades, así como caída de presión en el cabezal. Para ello se divide el canal de flujo en secciones (k) y capas (n). Los pasos a seguir se inician con una iteración a la entrada del canal que nos permite calcular el perfil de velocidades.

- 1.- Suponemos temperatura de entrada conocida como un valor medio
- 2.- Calculamos el valor de velocidad de cizalla máxima (modelo isotérmico).
- 3.- Calculamos viscosidad para ese gradiente y temperatura.
- 4.- Calculamos DP/Dz de la ecuación discretizada.
- 5.- Calculamos perfil de velocidades.
- 6.- Recalculamos el perfil de velocidades de cizalla de la ecuación general.
- 7.- Recalculamos viscosidades.
- 8.- Recalculamos DP/Dz y velocidades.
- 9.- Repetimos el proceso hasta que el perfil de velocidades tenga una variación inferior a un límite.
- 10.- A continuación se procede a calcular sección por sección los diferentes perfiles. Para ello en principio extrapolamos los valores de temperaturas que tenemos como referencia.

A partir de aquí, y conociendo las viscosidades extrapoladas calculamos caída de presión, velocidades, velocidades de cizalla. Recalculamos viscosidades y obtenemos perfil de temperaturas a partir de la ecuación discretizada paso a paso.

9.6.- Algunos aspectos sobre la generación del mallado.-

Al definir el mallado para el desarrollo del método de diferencias finitas explícito se ha de considerar la estabilidad y convergencia de la solución. La estabilidad entendida como el no crecimiento de un error introducido durante el proceso que produzca soluciones absurdas. La convergencia es la garantía de acercamiento a la solución real de la ecuación diferencial en el sentido de que cuanto menor sea el intervalo de la malla más nos acercaremos al valor verdadero.

Ante todo en DIEPLAST se ha buscado la operatividad y el reducir al máximo el trabajo del usuario. Para ello se proporcionan dos métodos para definir la malla; el primero lo hemos denominado *manual* y el segundo *automático*.

- Método manual.

El motivo de llamarse *manual* no se debe a que el programa no desarrolle automáticamente el mallado (que sí lo hace) sino a que se ha de indicar tanto el número de capas como el incremento del elemento en el sentido axial. Este valor incremental va a ser constante a lo largo de todo el cabezal. Tan solo al final de cada tramo se hace un pequeño ajuste de tal manera que si el segmento restante después de hacer la división es inferior a la mitad del valor constante se añadirá este segmento al penúltimo si es superior se conformará como segmento individual.

El método manual no garantiza la estabilidad y convergencia, siendo recomendable la comparación de la solución con la obtenida mediante método analítico (por ejemplo viscosidades representativas). Si al aumentar la definición de la malla la solución converge sobre un valor es indicativo que efectivamente hemos encontrado el valor buscado.

- Método automático.

Por método *automático* se ha entendido la generación automática del mallado a partir de un valor introducido por el usuario que es el número de capas. Para la determinación del ancho del elemento nos hemos basado en el *criterio del índice* [35] aunque no estrictamente como veremos luego.

Este criterio pretende garantizar la estabilidad y convergencia de la solución; para ello se debe cumplir que:

$$\text{Max} \sum |A_{j,k}| \leq 1 \quad (9.19)$$

Los $A_{j,k}$ son los coeficientes que afectan a las temperaturas en la ecuación (9.16) para geometrías de revolución y (9.18) para geometrías tipo ranura. De acuerdo a ésto las expresiones las podemos poner de la siguiente manera:

Geometría tipo ranura

$$T_{k+1,n} = T_{k,n+1} * A + T_{k,n-1} * (A) + T_{k,n} * (1 - 2 * A) + K_1 \quad (9.20)$$

Geometría de revolución

$$T_{k+1,n} = T_{k,n+1} * B * \left[\frac{\Delta r + 2 * r}{2 * r} \right] + T_{k,n-1} * B * \left[\frac{2 * r - \Delta r}{2 * r} \right] + T_{k,n} * (1 - 2 * B) + K_2 \quad (9.21)$$

K_1, K_2 son los términos de disipación que no vamos a considerar.

$$A = \frac{\lambda \times \Delta x}{\rho \times C_p \times \bar{V}_x \times \Delta y^2} \quad (9.22)$$

$$B = \frac{\lambda \times \Delta z}{\rho \times C_p \times \bar{V}_z \times \Delta r^2} \quad (9.23)$$

De acuerdo a la condición (9.19) y a las expresiones 9.20 y 9.21 tenemos que:

$$\text{Max} [|A| + |A| + |1 - 2 * A|] \leq 1 \quad (9.24)$$

$$\text{Max} \left[\left| B * \left[\frac{\Delta r + 2 * r}{2 * r} \right] \right| + \left| B * \left[\frac{2 * r - \Delta r}{2 * r} \right] \right| + |1 - 2 * B| \right] \leq 1 \quad (9.25)$$

9.24 se cumple cuando $A \leq \frac{1}{2}$ o sea, de 9.22

$$\Delta x \leq \frac{\bar{V}_x \times \Delta y^2 \times \rho \times C_p}{2 \times \lambda} \quad (9.26)$$

Igualmente ocurre para 9.25, $B \leq \frac{1}{2}$ (las expresiones entre corchetes son siempre positivas al ser $r > \Delta r$)

$$\Delta z \leq \frac{\bar{V}_z \times \Delta r^2 \times \rho \times C_p}{2 \times \lambda} \quad (9.27)$$

Las expresiones 9.26 y 9.27 nos sirven para determinar el valor máximo de Δz en una sección k para garantizar la estabilidad y convergencia. Como valor de \bar{V}_z se debe elegir el mínimo que lógicamente es el más desfavorable. Vemos también la dependencia de Δz con Δy e Δr .

Nosotros no hemos seguido exactamente este criterio ya que supodría la definición de la malla al mismo tiempo del proceso de iteración y cálculo de parámetros. El camino seguido es el siguiente:

- Se introduce el número de capas.
- Para cada tramo se determina la expresión (9.26) ó (9.27) al inicio y final del mismo.
- Se utiliza el valor medio de velocidad en esa sección.
- Se elige el valor de Δx ó Δz menor entre estos dos extremos.
- Se continua con el mismo proceso tramo por tramo.

Con esta forma de proceder obtendremos valores de ancho de elemento más pequeños en aquellos tramos que lo requiere.

En general un número de capas igual a 10 suele garantizar la estabilidad y convergencia por supuesto de acuerdo al valor de los intervalos.

10.- MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LOS DIFERENTES DISTRIBUIDORES Y DIFUSORES CONSIDERADOS.-

10.1.- Para geometrías de revolución.-

10.1.1.- Tipo araña.-

** Definición geométrica*

Este tipo de soportes se forma por un número variable de brazos en función del esfuerzo que han de soportar. Cada brazo tiene un perfil que permite el paso del flujo con la menor perturbación posible. En ocasiones se suele disminuir la sección de paso en sentido radial para aumentar la velocidad de la masa y así evitar posibles *quemadas* disminuyendo el tiempo de residencia y quitando zonas de *estacionamiento*; no obstante también puede producir aumento de la fricción.

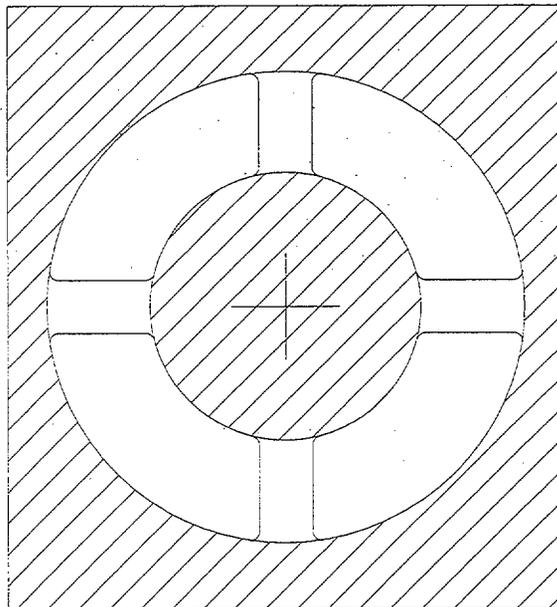


Fig. 10.1.- Soporte tipo araña

*** Método de cálculo**

En este trabajo se han contemplado dos sistemas de cálculo. El primero es un método numérico en la línea señalada en el apartado 9 y en donde aproximaremos cada espacio entre brazo y brazo a una sección tipo ranura (por cada ranura pasa un caudal igual al total dividido por el número de brazos).

El segundo método es analítico y por supuesto aproximado. Se trata de aplicar las expresiones analíticas utilizadas para flujo anular con un valor del caudal (mm³/Sg) corregido según la siguiente expresión:

$$K = \frac{\pi \times (R_a^2 - R_i^2)}{\pi \times (R_a^2 - R_i^2) - N_s \times B \times (R_a - R_i)} \quad (10.1)$$

Donde N_s = Número de brazos

$$\dot{Q}^* = \dot{Q} \times K \quad (10.2)$$

10.1.2.- De dos hileras de brazos concéntricos.-*** Definición geométrica**

Es un soporte donde el flujo se dificulta aún más que en el anterior al existir mayor número de brazos y en dos hileras diferentes.

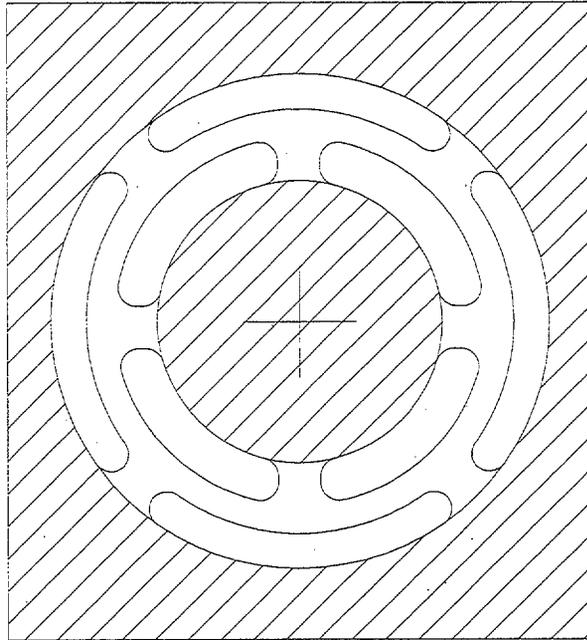


Fig. 10.2.- Soporte de dos hileras de brazos

El número de brazos (o de huecos) será variable.

*** Método de cálculo**

Para el cálculo de este soporte tomaremos que:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \quad (10.3)$$

Sabemos que $\dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \dot{V}_{total}$ (10.4)

De 10.3 y aplicando el método de las viscosidades representativas para flujo anular:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \times \bar{\eta}_1 \times \dot{V}_1 \times K_1}{\pi \times (R_{a1}^2 - R_{i1}^2) \times \bar{R}_1^2} = \frac{8 \times \bar{\eta}_2 \times (\dot{V}_{total} - \dot{V}_1) \times K_2}{\pi \times (R_{a2}^2 - R_{i2}^2) \times \bar{R}_2^2} \quad (10.5)$$

Donde:

$$\bar{R} = R_a \times \left(1 + k^2 + \frac{1 - k^2}{Lnk}\right)^{1/2} \quad (10.6)$$

$$k = \frac{R_i}{R_a} \quad (10.7)$$

Si definimos
$$a_{1,2} = \frac{\bar{\eta} \times K}{(R_a^2 - R_i^2) \times \bar{R}^2} \quad (10.8)$$

Nos queda ,despejando:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_{total} \times \frac{a_2}{a_1 + a_2} \quad (10.9)$$

La expresión 10.9 la podemos resolver por iteración al depender a_1 y a_2 de la viscosidad representativa, calculando finalmente \dot{V}_1 y \dot{V}_2 y en consecuencia el resto de los parámetros.

10.1.3.- Helicoidal.-

*** Definición geométrica**

Es de vital importancia el tener una buena definición de la geometría en este tipo de distribuidores. la tipología objeto de cálculo la podemos observar en la Fig. 10.3, pero en cualquier caso las características principales adoptadas en este trabajo son:

- a) La espirales siguen un ángulo ϕ cualquiera.
- b) El número de espirales se puede variar de un diseño a otro.
- c) La profundidad de los canales espirales es variable a lo largo de las mismas.
- d) El ancho de los canales es variable en el último tramo hasta valer cero.
- e) La inclinación de las paredes interior y exterior tienen ángulos que pueden cambiar según el diseño.

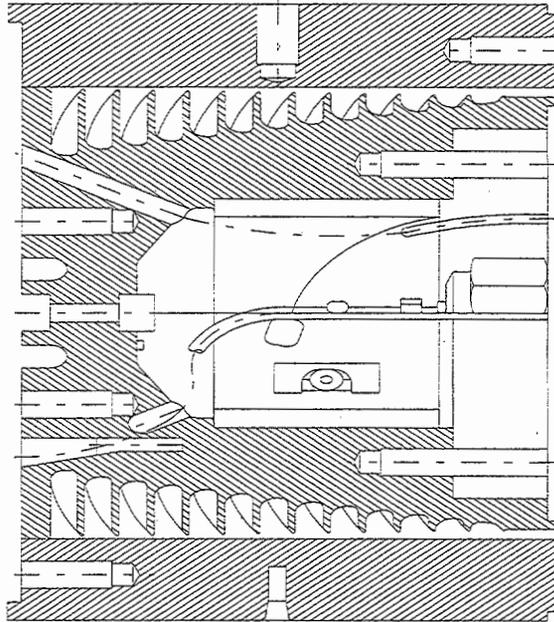


Fig. 10.3.- Distribuidor helicoidal

En la siguiente figura podemos ver la parametrización, en función del ángulo de giro θ y la altura Y , de algunas variables geométricas.

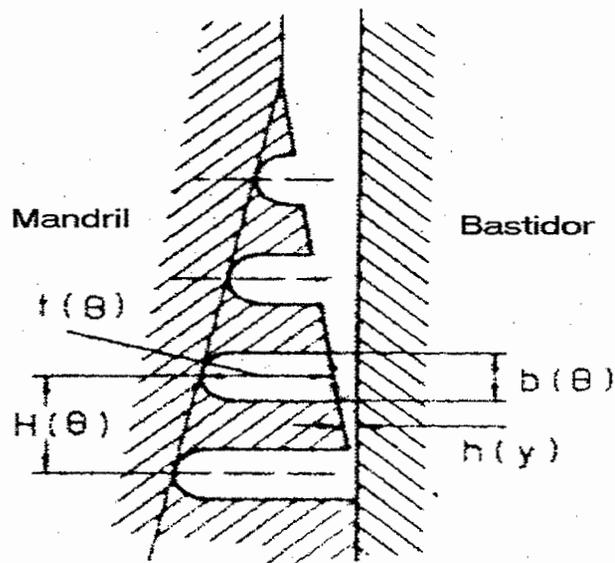


Fig.10.4.- Parámetros geométricos distribuidor helicoidal.

*** Método de cálculo**

Se ha utilizado el método numérico de PROCTER [36,15,23,25,8,37] por el cual se ha dividido tanto el canal espiral como el anular en pequeñas porciones sobre las cuales se ha efectuado un balance de caudales (Fig. 10.5).

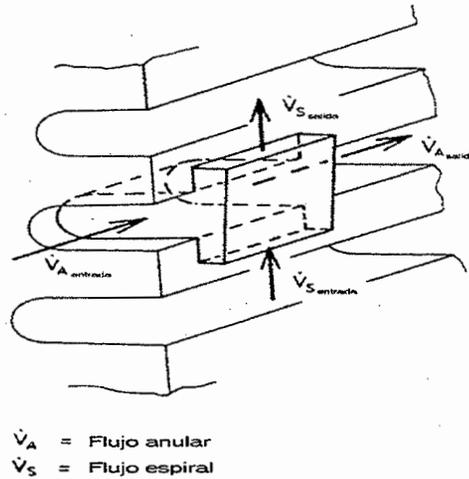


Fig.10.5.- Balance de caudales

$$\dot{V}_{esp}(n) + \dot{V}_{an}(n) = \dot{V}_{esp}(n+1) + \dot{V}_{an}(n + N_0) \quad (10.10)$$

$$N_0 = \frac{360}{N_{esp}} \times \frac{1}{\Delta\theta} \quad (10.11)$$

N_{esp} = Número de espirales

Para efectuar el análisis se han realizado las siguientes consideraciones:

- El flujo en la zona espiral no es afectado por el flujo en la zona anular y viceversa.
- El flujo lateral, que sale de la espiral, no tiene efecto sobre el flujo de la misma.
- El efecto de la curvatura en el mandril es despreciado, dado que el diámetro del mandril es considerablemente mayor que la abertura del canal.

- La espiral es dividida en segmentos para el cálculo, considerándolas como pequeños tramos rectangulares (slits) y aplicándoles el correspondiente factor de forma (Fp) como corrector. Lo mismo se realizará con los tramos de la zona anular.
- De la suposición que las isobáras son paralelas al espesor de salida tenemos que:

$$\Delta P_{anular} = \Delta P_{espiral} \quad (10.12)$$

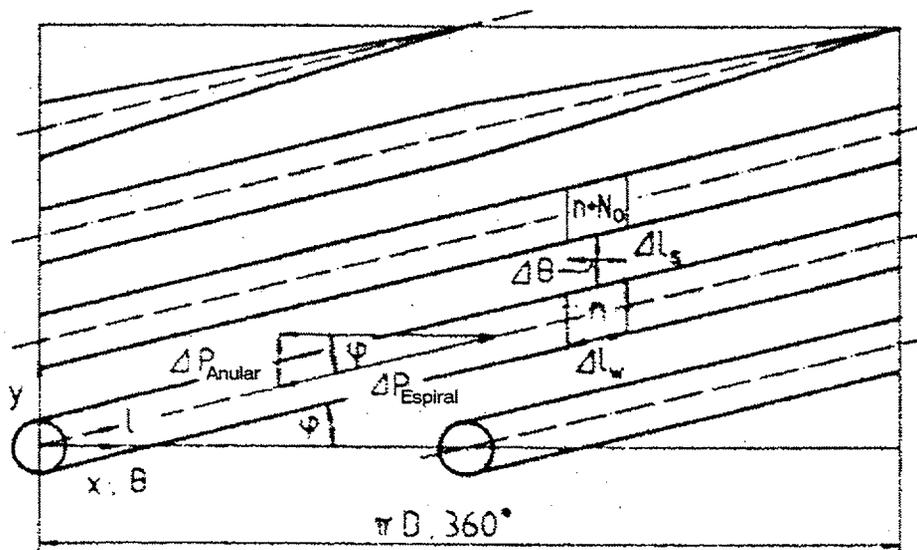


Fig. 10.6.- Discretización del canal de flujo

De la Fig. 10.6 obtenemos que :

$$\frac{dP}{dy}_{anular} = \frac{dP}{dl}_{espiral} \times \frac{1}{\text{Sen}\phi} \quad (10.13)$$

Para calcular los parámetros habituales es necesario iterar para cada elemento espiral y anular de acuerdo a las expresiones 10.10 y 10.13. Para ello mediante el método de viscosidades representativas tenemos las siguientes expresiones que aplicaremos a los elementos espirales y anulares:

$$\bar{\gamma} = \frac{6 \times \dot{V}}{B \times H^2} \times e_{\#} \quad (10.14)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{12 \times \bar{\eta} \times \dot{V}}{B \times H^3 \times F_p} \quad (10.15)$$

Este proceso de iteración al final se reduce a resolver un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas por el cual vamos obteniendo diferentes valores de V_{esp} y V_{an} hasta que converjan para cada elemento. Una vez que conocemos los valores de los caudales de entrada y salida a cada elemento según 10.10 obtendremos $\bar{\eta}_{esp}, \bar{\eta}_{an}, \Delta P_{esp}, \Delta P_{an}, \gamma, \tau, \bar{v}_m, t_m$.

Los pasos seguidos para la iteración elemento a elemento son los siguientes:

1.- Para iniciar el proceso sabemos que para los primeros elementos entre $n=1$ y $n=N0$

$$V_{an}(n) = 0 \text{ y que para } n=1 \text{ } V_{esp}(1) = \frac{\dot{V}_t}{N_{esp}}$$

2.- Como punto de partida para cada elemento adoptamos que

$$V_{esp}(n+1) = V_{an}(n + N0) = V_{esp}(n) / 2$$

3.- Mediante la expresión 10.14 calculamos $\bar{\gamma}_{esp}, \bar{\gamma}_{an}$ obteniendo en consecuencia las respectivas $\bar{\eta}_{esp}, \bar{\eta}_{an}$

4.- Con estos valores de viscosidad sustituimos en las expresiones 10.15, junto a las dimensiones de cada elemento (aproximado a slit), factor de forma y caudales (para el elemento espiral tomamos un valor medio entre entrada y salida y para el elemento anular el de salida ya que consideramos el trayecto entre elementos espirales de diferentes hélices). Igualamos las expresiones 10.15 y con la 10.10 tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, calculando los caudales desconocidos.

5.- Con la nueva distribución de caudales volvemos al punto 3 y repetimos el proceso hasta que los valores converjan por debajo de un error.

Ya veremos con la estructura del programa DIEPLAST que para el estudio de este tipo de distribuidores se analizarán entre otros parámetros la evolución del flujo lateral que va saliendo de la espiral a medida que esta avanza así como un punto importante en el análisis, que es la desviación del caudal a la salida en relación a un valor medio. Conseguir una desviación a la salida pequeña significa obtener una buena uniformidad en toda la periferia del extrusado.

10.2.- Para geometrías rectangulares tipo ranura.

10.2.1.- Tipo "Coathanger".-

*** Definición geométrica**

En este caso la geometría del distribuidor va a ser consecuencia del proceso de cálculo efectuado.

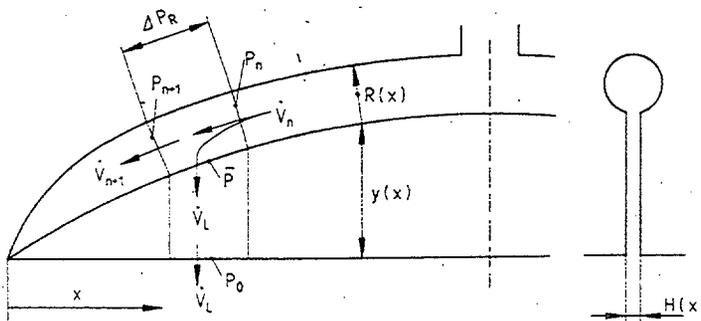


Fig. 10.7.- Geometría distribuidor tipo "coathanger"

Vemos que existe una variación del radio $R(x)$ según avanza el material. Se trata pues de definir $R(x)$ y en consecuencia $y(x)$.

*** Método de cálculo**

Utilizaremos el método de viscosidades representativas para finalmente mediante iteración llegar a la solución que nos defina la geometría deseada [15,18,8].

Como hipótesis de partida establecemos que:

$$\bar{v}_s(x) = \frac{\dot{V}_{total}}{B \times H} = cte \quad \text{Flujo a través de ranura} \quad (10.16)$$

$$v_R(x) = \frac{x}{L} \times \dot{V}_0 \quad \text{Flujo a través de la zona curva} \quad (10.17)$$

$$\Delta P(x) = \Delta P_R(x) + \Delta P_s(x) = cte \quad (10.18)$$

La condición que establecemos para poder resolver el problema es que la “velocidad de cizalla” representativa en la zona curva es constante.

$$\bar{\gamma}_R = \frac{4 \times \dot{V}_R(x)}{\pi \times R^3(x)} \times e_0 = cte \quad (10.19)$$

Aplicando la expresión anterior para $x=L$ y despejando nos queda:

$$R(x) = R_0 \times \left(\frac{x}{L}\right)^{1/3} \quad (10.20)$$

Utilizando las expresiones de $\Delta P_R(x)$, $\Delta P_s(x)$, sustituyendo en 10.18, derivando, igualando a cero y posteriormente integrando $\frac{dy(x)}{dx}$ tenemos que:

$$y(x) = \frac{\bar{\eta}_R}{\bar{\eta}_s} \times \frac{H^3 \times L^{4/3} \times x^{2/3}}{\pi \times R_0^4} \quad (10.21)$$

Para $x=L$ $y(x) = y_0$ con lo cual

$$y(x) = y_0 \times \left(\frac{x}{L}\right)^{2/3} \quad (10.22)$$

y_0, R_0 se relacionan de la siguiente forma:

$$y_0 = \frac{\bar{\eta}_R}{\bar{\eta}_s} \times \frac{H^3 \times L^2}{\pi \times R_0^4} \quad (10.23)$$

Dado que a su vez $\bar{\eta}_R = f(R_0)$ la única manera de resolver la ecuación anterior es iterando.

La caída de presión total será la de un punto a través de la ranura en el centro del cabezal.

$$\Delta P = \frac{12 \times \bar{\eta}_s \times \dot{V}_0 \times y_0}{L \times H^3} \quad (10.24)$$

El tiempo medio de residencia se puede tomar a la salida en la máxima longitud en el centro del cabezal.

$$\bar{t} = \frac{L \times H \times y_0}{\dot{V}_0} \quad (10.25)$$

A modo de resumen el procedimiento a seguir para el diseño es el siguiente:

- a) Definición de la presión máxima admisible y del espesor de la zona de relajación de datos empíricos; determinación de la máxima longitud de dicha zona en el centro del cabezal (y_0) de la ecuación 2.24.
- b) Determinación del radio máximo del distribuidor (R_0) mediante la ecuación 10.23. Como interviene la viscosidad representativa que es función de R_0 a través de $\bar{\eta}_R$ es necesario un proceso de iteración.

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_R &= f\left(\frac{4 \times \dot{V}_0}{\pi \times R_0^3} \times e_0\right) \\ \bar{\eta}_s &= f\left(\frac{6 \times \dot{V}_0}{L \times H^2} \times e_{\#}\right) \end{aligned} \quad (10.26)$$

c) Una estimación de la dependencia del cabezal con las condiciones de proceso puede ser tomar el valor R_0 obtenido del paso anterior y determinar un nuevo valor de y_0 para un punto diferente de operación u otro material, comparando con el valor obtenido en a). La diferencia más pequeña entre los dos valores de y_0 , la menos pronunciada es la dependencia sobre las condiciones de contorno.

En el programa DIEPLAST se dá la opción de partir de una caída de presión o partir de un valor de y_0 dado.

11.- UNA APROXIMACIÓN A LA DEFORMACIÓN DEL EXTRUSADO.-

11.1.- Viscoelasticidad de los polímeros.-

Los polímeros tienen además de propiedades viscosas, propiedades elásticas (viscoelasticidad). Esta componente elástica no la hemos considerado al desarrollar las ecuaciones que analizan el flujo (principalmente al no tener en cuenta las tensiones normales) pero sin embargo cobra especial importancia sobre todo en los procesos de extrusión al influir de manera fundamental en las dimensiones del extrusado.

El polímero durante la extrusión se deforma en las transiciones dentro del cabezal y parte de esta deformación es elástica y no permanente. A la salida del cabezal todas estas deformaciones elásticas emergen y deforman el extrusado.

El proceso de reagrupamiento de las macromoléculas, llamado “relajación”, ocurre dentro del cabezal y a la salida ya que es un proceso lento. Este fenómeno de recuperación se suele conocer como “memoria del fluido”. No todos los modelos utilizados más usualmente tienen en cuenta este efecto de memoria sino que parten de un estado puntual elástico concretamente a la salida del cabezal. Tengamos en cuenta que en dicho punto se produce un fenómeno que es el paso de un perfil de velocidades tipo parabólico a uno de velocidad constante; este reagrupamiento influye lógicamente en la deformación.

Una manera muy popular de cuantificar el potencial elástico de un fluido es el número de Weissenberg (también tomado como el número de Deborah). Este número adimensional se puede calcular como:

$$W_i = \lambda \times \dot{\gamma}_w \quad (11.1)$$

Donde:

W_i = Número de Weissenberg

λ = Tiempo de relajación del material

$\dot{\gamma}_w$ = Velocidad de cizalla en la pared

Si el número de Deborah es ∞ el material se comporta como un sólido elástico y si es 0 se comporta como un cuerpo viscoso. Un valor intermedio indica un cuerpo viscoelástico.

Wortberg [33] señala dos tipos de deformaciones durante el flujo de un polímero a través de un cabezal:

a) Deformación debida al ensanchamiento o compresión en secciones divergentes o convergentes del canal respectivamente.

$$\dot{E}_d = \frac{dv}{dx} \quad (11.2)$$

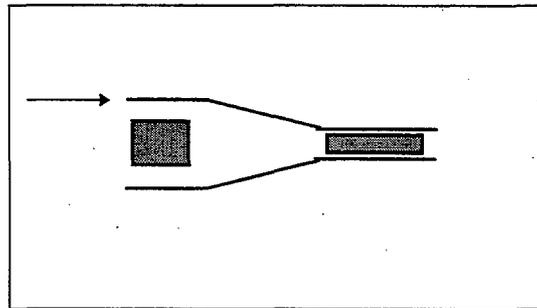


Fig. 11.1.-

b) Deformación debida a la velocidad de cizalla

$$\dot{E}_s = \frac{dv}{dy} = \dot{\gamma} \quad (11.3)$$

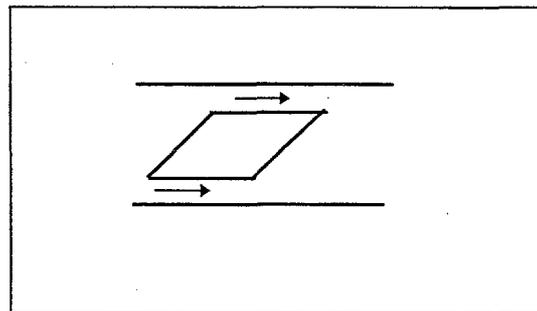


Fig. 11.2.-

De acuerdo a Henky [15] podemos definir la deformación reversible como:

$$E_R(t) = Ln \frac{l(t)}{l_\infty} = Ln \lambda_R(t) \quad (11.4)$$

Donde:

λ_R = Tasa de extensión

$l(t)$ = Longitud en un tiempo t

l_∞ = Longitud después de una completa recuperación

Si suponemos una deformación totalmente reversible tenemos la siguiente curva de relajación exponencial:

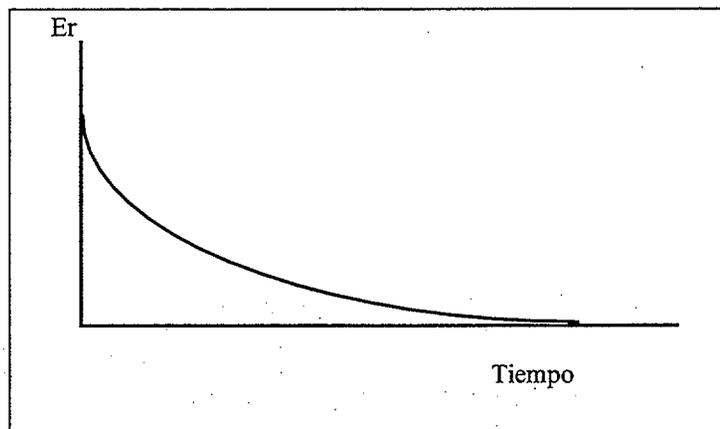


Fig. 11.3.- Curva de relajación

Dicha curva se expresa por la ecuación 11.5

$$\frac{dE_R}{dt} = -\frac{E_R}{\tau(E_R)} \quad (11.5)$$

$\tau(E_R)$ = Tiempo de relajación

Este proceso puede ser explicado por el modelo de un resorte y amortiguador (Modelo de Maxwell) Fig. 11.4. Ante una deformación inicial del resorte para $t=0$, con el paso del tiempo esta energía elástica se transforma en viscosa (fricción) y se

simboliza por el amortiguador, recuperándose para un tiempo que tiende a infinito la forma inicial que tenía el resorte.

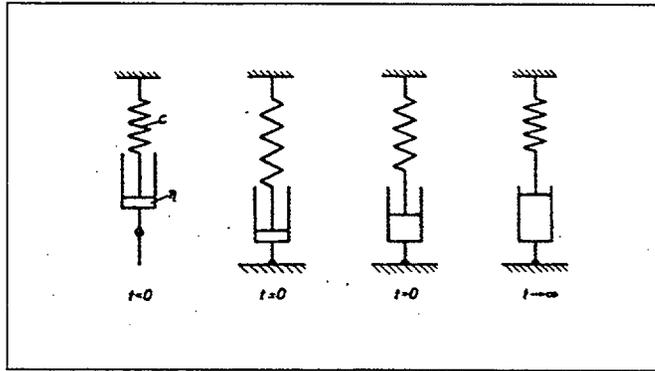


Fig. 11.4.- Modelo de Maxwell

No obstante este modelo no permite una correcta descripción global de los procesos de *relajación* y *fluencia* (creep) del material según comenta Matsuoka en su obra “Relaxation Phenomena in Polymers”[19].

11.2.- Factor de hinchamiento (swell). Definiciones.-

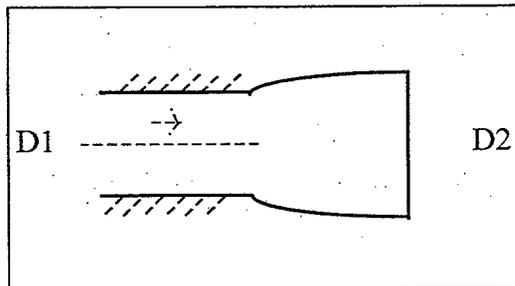
El objetivo último de la aplicación de los diferentes modelos viscoelásticos es la de obtener el llamado factor de hinchamiento (swell) que nos permita conocer las dimensiones en estado de equilibrio y con salida libre del extrusado (es decir sin considerar calibrado ni enfriamiento posterior).

El factor de hinchamiento tiene su definición genérica como sigue:

$$S_w = \frac{\text{Dimensión de equilibrio}}{\text{Dimensión a la salida del cabezal}} \quad (11.6)$$

Aplicando dicha definición a los casos contemplados en DIEPLAST:

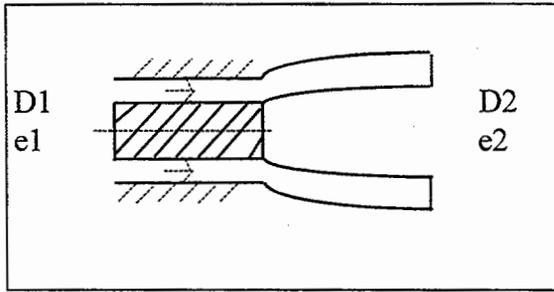
*** Geometría circular**



$$S_{wD} = \frac{D_2}{D_1} \quad (11.7)$$

Fig. 11.4.- Geometría circular

*** Geometría anular**

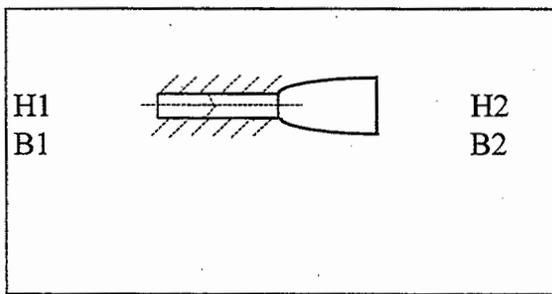


$$S_{wD} = \frac{D_2}{D_1} \quad (11.8)$$

$$S_{we} = \frac{e_2}{e_1} \quad (11.9)$$

Fig. 11.6.- Geometría anular

*** Geometría rectangular tipo ranura**



$$S_{wB} = \frac{B_2}{B_1} \quad (11.10)$$

$$S_{wH} = \frac{H_2}{H_1} \quad (11.11)$$

Fig. 11.7.- Geometría tipo ranura

Los valores de equilibrio no se alcanzan justo a la salida como ya sabemos por el proceso de relajación; no obstante un alto porcentaje de la dimensión normal se alcanza en unos pocos segundos. esto se puede observar por ejemplo en las experiencias de N. Orbey y J.M. Dealy [38] donde se comprueba que entre un 60% y un 80% de la relajación total tiene lugar en los primeros segundos y la relajación total tarda entre 5 y 10 minutos (prueba realizada con HDPE en geometrías anulares).

11.3.- Visión general de los modelos viscoelásticos más utilizados.-

No es el objeto de esta tesis el entrar a comentar todos los métodos tendentes a estimar el valor del “hinchamiento” producido en el extrusado, no obstante enumeraremos y comentaremos brevemente algunos de ellos recopilados en la bibliografía disponible.

**** Modelos semiempíricos***

Tienen la ventaja de su simplicidad y de no requerir potentes ordenadores. En [39,40] los vemos aplicados al estudio del proceso de fabricación del *macarrón* utilizado para soplado posterior. en estos estudios se separa el proceso de hinchamiento del estiramiento por peso posterior; se encuentra una buena aproximación con estos métodos.

**** Modelos basados en la teoría de elasticidad***

Según la ley de Hooke la deformación unitaria de recuperación (S_r) basándonos en una viscoelasticidad lineal es:

$$S_r = \tau_{12} \times J_e^0 \quad (11.12)$$

Donde τ_{12} es la tensión de cortadura y J_e^0 la complianza.

Si establecemos que la diferencia de tensiones normales principales (N_1) es proporcional al cuadrado de la velocidad de cizalla nos queda que:

$$S_r = \frac{N_1}{2 \times \tau_{12}} \quad (11.13)$$

Sr es una alternativa al número de Weissenberg y suele ser una medida de la elasticidad. Diferentes expresiones relacionando el factor de hinchamiento con Sr las tenemos con Vlachopoulos et al , Utracki et al , Samara () y Tanner [45].

* *Métodos numéricos*

- Diferencias finitas

La mayor ventaja de este método es la simplicidad de la formulación y el fácil refinamiento de la malla. La principal dificultad es cuando estudiamos la *superficie libre* , que requiere técnicas especiales y la aplicación de condiciones de contorno en la superficie. Horsfall , Dutta y Ryan son autores que trabajaron en esta línea [45].

- Elementos de contorno

La mayoría de los trabajos con elementos de contorno vienen de Australia y fueron desarrollados por Bush y Tanner.

La mayor ventaja estriba en el relativamente pequeño sistema de ecuaciones a resolver.

- Método de elementos finitos

Es sin duda el método más popular para determinación del hinchamiento ya que permite manejar geometrías complicadas y la dificultad de las condiciones de contorno en la superficie libre. La mayoría de los trabajos han sido desarrollados con la formulación de Garlekin.

En cuanto a los modelos reológicos aplicados hacer mención a la consideración de fluidos newtonianos, ley exponencial, fluidos viscoelásticos con modelos diferenciales (Upper Convected Maxwell model, UCM) e integrales; los diferenciales con problemas de inestabilidad para un elevado número de Weissenberg.

En el siguiente apartado nos centraremos en dos métodos bien diferenciados y que son los aplicados en el programa DIEPLAST.

11.4.- Métodos considerados en el presente trabajo.-

11.4.1.- Método numérico de Wortberg y Junk [3,15,33].-

Este sistema se basa en un método de diferencias explícita que permite una estimación de la deformación relativamente fácil. Tiene en cuenta el efecto memoria durante todo el proceso de deformación ya que considera el proceso de relajación durante el flujo. No ocurre así con el efecto producido por el reagrupamiento de velocidades a la salida del cabezal.

Las deformaciones elásticas reversibles producidas en un volumen del elemento se determinan directamente a continuación del cálculo de temperaturas y velocidades.

El valor medio del estado de deformación a la salida del cabezal (\bar{E}_R) puede ser relacionado con el factor de hinchamiento S_w como veremos en el siguiente apartado.

En las expresiones 11.2 y 11.3 vimos los dos tipos de deformaciones producidas durante el flujo, la tasa de deformación representativa \dot{E}_{rep} es el resultado de la superposición de ambas (11.14)

$$\begin{aligned}\dot{E}_{rep} &= a \times \dot{E}_s + b \times \dot{E}_d \\ \dot{E}_s &= \dot{\gamma} \\ \dot{E}_d &= \frac{dv}{dx}\end{aligned}\tag{11.14}$$

Por ejemplo para el LDPE [33]:

$$\dot{E}_{rep} = 0.01 \times \dot{E}_s + \dot{E}_d\tag{11.15}$$

Para calcular la deformación reversible del punto $X_{k,n}$ al $X_{k+1,n}$ la deformación representativa es calculada para el gradiente de velocidades como su valor medio

$$\frac{\dot{\gamma}_{k+1,n} + \dot{\gamma}_{k,n}}{2} \text{ y para la tasa de extensión } \frac{v_{k+1,n} - v_{k,n}}{\Delta x}$$

El modelo de W/J es un proceso por el cual se superponen la relajación de las deformaciones ya existentes con las nuevas que van apareciendo.

Tal como vemos en la Fig. 11.8 durante el intervalo Δt_i , la forma exterior de la partícula de fluido se mantiene. La deformación reversible inicial decrece durante este tiempo del valor E_{Ri-1} al E_{Ri}^* . Al término del intervalo Δt_i , la deformación adicional $\Delta E_i = \dot{E}_{i+1}$ es desarrollada a través de un cambio de paso y es asimismo completamente reversible.

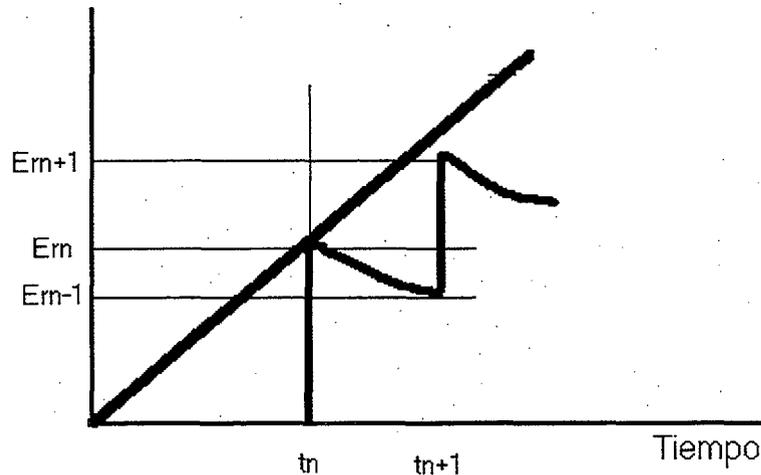


Fig.11.8.- Modelo de Wortberg y Junk

De la expresión 11.5 y superponiendo la relajación con la nueva deformación nos queda:

$$dE_R = \left[\dot{E} - \frac{E_R(t)}{\tau(E_R)} \right] \times dt \quad (11.16)$$

$$dE_R = \left[\dot{E} - \frac{E_R(t)}{\tau(E_R)} \right] \times dt \quad (11.16)$$

El tiempo de relajación depende del material y para muchos termoplásticos se puede expresar como :

$$\tau(E_R) = C_1 \times \exp(-C_2 \times E_R) \quad (11.17)$$

C1 y C2 son constantes y C1 contiene el efecto de temperatura (conociéndola para una temperatura concreta se puede conocer para otra aplicando WLF).

La expresión 11.16 para la capa n de la rejilla y en el incremento de tiempo $\Delta t_{k,k+1}$ se puede poner como:

$$\begin{aligned} \Delta E_R = E_{Rk+1} - E_{Rk} &= \Delta t_{k,k+1} \times \left[\dot{E}_{rep} - \frac{E_{Rk,n}}{C_1 \times \exp(-C_2 \times E_{Rk,n})} \right] = \\ &= \frac{2 \times \Delta x}{v_{k,n} + v_{k+1,n}} \times \left[\dot{E}_{rep} - \frac{E_{R,k,n}}{C_1 \times \exp(-C_2 \times E_{Rk,n})} \right] \end{aligned} \quad (11.18)$$

Si en vez de calcular *deformaciones reversibles longitudinales* calculamos *deformaciones reversibles circunferenciales*:

$$E_{Um} = \dot{E}_{rep} \times \Delta t = Ln \left[\frac{R_{k+1,n}}{R_{n,k}} \right] \quad (11.19)$$

En el programa DIEPLAST se ha implementado en los casos de geometría anular la posibilidad de determinar tanto las deformaciones reversibles longitudinales como las circunferenciales.

A la salida del cabezal en DIEPLAST se contempla una simulación de la relajación donde en 11.18 el término \dot{E}_{rep} desaparece al no haber nueva deformación.

11.4.2.- Cálculo del factor de hinchamiento. Proceso de relajación.-

Una vez hemos calculado la deformación reversible media a la salida del cabezal, si atendemos a su definición:

$$\bar{E}_R = Ln \frac{L_1}{L_2} \quad (11.20)$$

L_1 : Longitud inicial (deformado)

L_2 : Longitud final (recuperado)

Asumiendo volumen constante durante la recuperación, para un perfil rectangular:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{B_1 \times H_1}{B_2 \times H_2} \quad (11.21)$$

Sabemos que: $S_{wH} = \frac{H_2}{H_1}$ (11.22)

$$S_{wB} = \frac{B_2}{B_1} \quad (11.23)$$

Por lo tanto de acuerdo a 11.20:

$$\bar{E}_R = Ln S_{wH} \times S_{wB} \quad (11.24)$$

Concluimos que:

$$S_{wH} = \exp(k \times \bar{E}_R) \quad (11.25)$$

$$S_{wB} = \exp(k^* \times \bar{E}_R) \quad (11.26)$$

k y k^* indican la anisotropía de los valores del hinchamiento y son generalmente diferentes (si la sección es cuadrada $k = k^*$), cumpliéndose que $k + k^* = 1$

Si suponemos igualdad de deformaciones unitarias en ambas direcciones nos quedaría ($k = k^* = 0.5$):

$$S_{wH} = S_{wB} = \exp(0.5 \times \bar{E}_R) \quad (11.27)$$

Del mismo modo obtenemos para geometría anular:

$$S_{wDm} = \exp(k \times \bar{E}_R) \quad (11.28)$$

$$S_{we} = \exp(k \times \bar{E}_R) \quad (11.29)$$

Dm : Diámetro medio

Y para geometría circular:

$$S_{wD} = \exp(0.5 \times \bar{E}_R) \quad (11.30)$$

A partir de las expresiones 11.27,11.28,11.29 y 11.30, teniendo en cuenta la relajación de los \bar{E}_R desde la salida del cabezal se ha desarrollado un proceso por el cual podemos determinar el Sw y en consecuencia las dimensiones del extrusado para cada instante de tiempo.

Así por ejemplo para la geometría tipo ranura suponiendo isotropía para un elemento y correspondiente a un tiempo t_i :

$$S_{wHi} = \exp(0.5 \times (\bar{E}_{R(i-1)} - \bar{E}_{R(i)})) \quad (11.31)$$

Por lo tanto:

$$Espesor_i = Espesor_{(i-1)} \times S_{wHi} \quad (11.32)$$

El tiempo total de relajación lo podemos estimar a partir de la expresión 11.5

$$t = \int_0^{\bar{E}_R} \left[\frac{E_R}{C_1 \times \exp(-C_2 \times E_R)} \right]^{-1} \times dE_R \quad (11.33)$$

12.4.3.- Método analítico de Tanner [36.45].-

Tanner desarrolló unas expresiones analíticas muy populares que permiten relacionar el factor de hinchamiento (W_s) con la deformación unitaria de recuperación (S_r).

Podemos establecer que para la diferencia de tensiones normales principales en la pared (N_{1w}) y la tensión de cortadura en la pared (τ_w) a la salida del cabezal:

$$W_s = S_r = \frac{N_{1w}}{2 \times \tau_w} = D_e \quad (11.34)$$

Para la determinación de la diferencia de tensión normal principal se ha seguido el modelo establecido por Oda et al [41] y más recientemente por Han et al [41], que indica que para la mayoría de los polímeros se puede establecer que:

$$N_1 = A \times \tau_{xy}^b \quad (11.35)$$

A y b son parámetros que por ejemplo para el PS tienen los siguientes valores:

$$A = 3.47 \times 10^{-3} Pa^{1-b}$$

$$b = 1.66$$

No obstante según Huang y White [41] estos valores pueden cambiar por encima de un valor límite de velocidad de cizalla.

Si aplicamos 11.35 a la pared del cabezal en la salida:

$$N_{1w} = A \times \tau_w^b \quad (11.36)$$

Tanner desarrolló las siguientes expresiones para la determinación del factor de hinchamiento:

*** Geometría circular**

$$S_{wD} = \left[1 + \frac{S_r^2}{2} \right]^{1/6} + 0.1 \quad (11.37)$$

*** Geometría anular**

$$S_{wD} = \left[1 + S_r^2 \right]^{1/6} \quad (11.38)$$

*** Geometría rectangular tipo ranura**

$$S_{wH} = \left[1 + \frac{S_r^2}{3} \right]^{1/4} + 0.2 \quad (11.39)$$

Lo que podemos observar en este método es la no consideración de la memoria del polímero antes de llegar al punto de salida donde aplicamos las expresiones.

11.4.4.- Consideraciones a tener en cuenta.-

Una vez mostrados los dos métodos utilizados en DIEPLAST para la estimación del factor de hinchamiento es preciso hacer algunos comentarios al respecto:

1.- El método de Tanner es un método analítico que por supuesto no tiene la exactitud que ofrecen los M.E.F

- 2.- Es necesario conocer N_{1w} no solo en las expresiones de Tanner sino también en otros procedimientos. Esto no es siempre posible dada la dificultad de su determinación en determinadas condiciones de trabajo.
- 3.- Las expresiones de Tanner no tienen en cuenta los efectos de la memoria del polímero al llegar a la salida del cabezal.
- 4.- El método numérico de Wortberg y Junk se ha mostrado bastante eficaz con pruebas realizadas para el PE y PS, no obstante su desventaja radica en la no sencilla obtención de los parámetros experimentales C_1 y C_2 , debiéndose utilizar un reómetro de extensión para poder estimarlos a partir de la curva de relajación del material.
- 5.- El método de Wortberg y Junk no considera el efecto de reagrupamiento de velocidades justo a la salida del cabezal.
- 6.- En el caso de geometrías anulares y de ranuras donde tenemos dos factores de hinchamiento hemos de indicar los valores de k y k^* . Si suponemos un material isotropo $k=k^*$. Esta cualidad en experiencias de Orbey y Dealy [38] se muestran razonables en geometrías anulares con salidas rectas o convergentes de ángulo pequeño. No ocurre así para salidas divergentes donde son diferentes de forma apreciable. No obstante dado que el mayor interés en cabezales anulares de determinación del Sw es justamente en los de salida recta (por ejemplo para tubos) es una buena hipótesis suponer $k=k^*$.

Independientemente del modelo o método que se siga para determinar el factor de hinchamiento los diferentes autores parecen estar de acuerdo en que una determinación bastante aproximada del mismo no es posible en todas las condiciones de trabajo y en todos los rangos de velocidades de cizalla o de número de Weissenberg. Ello hace que sea uno de los puntos de la extrusión donde todavía se esté trabajando bastante y que en la práctica se opte por realizar el diseño de cabezales en base a la experiencia acumulada en lo que a este fenómeno se refiere; en este sentido se suele

orientar el dimensionamiento de la salida del cabezal en base a porcentajes con respecto a la sección del producto a fabricar. Sabemos que las dimensiones finales del extrusado no solamente las determina el factor de hinchamiento sino que en general se le somete posteriormente a un calibrado, enfriado e incluso estirado (no recomendable) para ajustar sus medidas; esto hace que en estos porcentajes que mencionamos anteriormente se engloben también todos estos efectos de manera combinada y realmente una cuantificación numérica por cálculo es bastante compleja.

A modo de conclusión decir que en DIEPLAST la estimación de S_w no es un objetivo en cuanto a su cuantificación real sino en cuanto a su evolución según modifiquemos diferentes parámetros. Al fin y al cabo de lo que se trata es de comparar opciones y elegir la mejor de todas.

BLOQUE III

VERIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DE LA HERRAMIENTA

DESARROLLADA

12.- COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS EN DIEPLAST CON OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.-

En el presente apartado se mostrarán algunos ejemplos analizados con el programa DIEPLAST y que han sido comparados con los resultados disponibles bien de otros programas de simulación o bien con pruebas experimentales que se han encontrado en la bibliografía disponible.

Comenzaremos con ejemplos en los cuales se verifican parámetros tales como presiones, velocidades, velocidades de cizalla, tensiones de cortadura, temperaturas, viscosidades. Finalmente se dedicará una especial atención a los resultados que hacen mención a la deformación del extrusado.

No obstante hemos de decir que no en todos los ejemplos se han podido reproducir exactamente las mismas condiciones iniciales bien por falta de algún dato que hace referencia al material o bien porque otros programas tienen datos de entrada que no se han sido incluidos en DIEPLAST o viceversa. En cualquier caso las pruebas se pueden tomar como bastante fiables si despreciamos en principio estos efectos colaterales que podemos asumir al menos en un error no demasiado elevado.

Para evitar exponer el gran volumen de datos y resultados y así no complicar las conclusiones se ha preferido dar éstos en forma de gráficos que comparativamente tal vez nos den una mayor claridad.

12.1.- Caso 1. Cabezal de soplado.-

Entre los muchos ejemplos de cabezales de extrusión para soplado posterior existente en la bibliografía y que han sido estudiados por diferentes autores (destacar por ejemplo a Paul B. Junk [3] en su tesis “Considerations on melt behaviour in continuous extrusion blow moulding”) se ha tomado uno que ha sido encontrado en dos referencias diferentes.

La primera de estas referencias es el trabajo desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Huazhong [34] y cuyos autores son J Sun, P Chen, S X Zheng y M Zhang. En este trabajo se elaboró un programa por el cual se podía analizar el flujo de un polímero a través de los canales de un cabezal bajo condiciones isotérmicas y utilizando el modelo de la ley exponencial (Ostwald deWaele). Con este modelo se pueden simplificar algo las expresiones generales del flujo (llegando en algún caso a analíticas) y resolver posteriormente las integrales.

La segunda referencia aparece en la publicación *Plastics Extrusion Technology* [18] y donde aparece un listado de expresiones matemáticas bastante completas y que también utilizan la ley exponencial. Pues bien dichas expresiones fueron implementadas en el programa de matemáticas *Mathcad* [46] e introduciendo los datos del polímero, es decir, densidad específica, producción, factor m , índice de fluidez así como la geometría tramo a tramo se obtuvieron una serie de resultados que han sido utilizados como elemento de comparación.

Por último también se han obtenido los resultados que da la utilización del método de las viscosidades representativas que incluye como “opción rápida” DIEPLAST; ésto nos sirve además para ver el grado de desviación que existe dentro del propio programa si utilizamos un método numérico o si utilizamos un método aproximado.

Los datos del material utilizado son los siguientes:

- Hostalen GF 7740 F
- Temperatura de masa: 210 ° C
- Producción: 100kg/h
- Densidad específica a 210° C : 0.77 g/cm³
- Exponente de flujo m : 1.79
- Fluidez ϕ : 35.8 $bar^{-m} \times s^{-1}$

El cabezal estudiado lo podemos ver en la Fig. 12.1 y tiene un soporte del mandril interior del tipo de dos hileras de brazos cuyas dimensiones las mostramos a continuación junto con el resto de la geometría.

| Tramo | Diámetro inicial inferior (mm) | Diámetro inicial superior (mm) | Diámetro final inferior (mm) | Diámetro final superior (mm) | Longitud (mm) |
|-------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| 1 | - | 32 | - | 32 | 46 |
| 2 | - | 32 | - | 44 | 6 |
| 3 | 0 | 44 | 62 | 118 | 37 |
| 4 | 62 | 118 | 62 | 118 | 14 |
| 5 (soporte) | D1=62;D2=78;D3=101.57;D4=116;L=39;Nº de brazos= 6 (ancho int. 14 ext. 21) | | | | |
| 6 | 62 | 116 | 62 | 118 | 10 |
| 7 | 62 | 118 | 62 | 115 | 5 |
| 8 | 62 | 115 | 88 | 95 | 22 |
| 9 | 88 | 95 | 88 | 95 | 28 |
| 10 | 88 | 95 | 88 | 96 | 23.5 |
| 11 | 96 | 120 | 96 | 120 | 15 |
| 12 | 96 | 120 | 67 | 84 | 67 |
| 13 | 67 | 84 | 62 | 78 | 34 |
| 14 | 62 | 78 | 62 | 78 | 20 |
| 15 | 62 | 78 | 30 | 40 | 32 |
| 16 | 30 | 40 | 30 | 40 | 15 |
| 17 | 30 | 40 | 46 | 50 | 18 |

Tabla 12.1

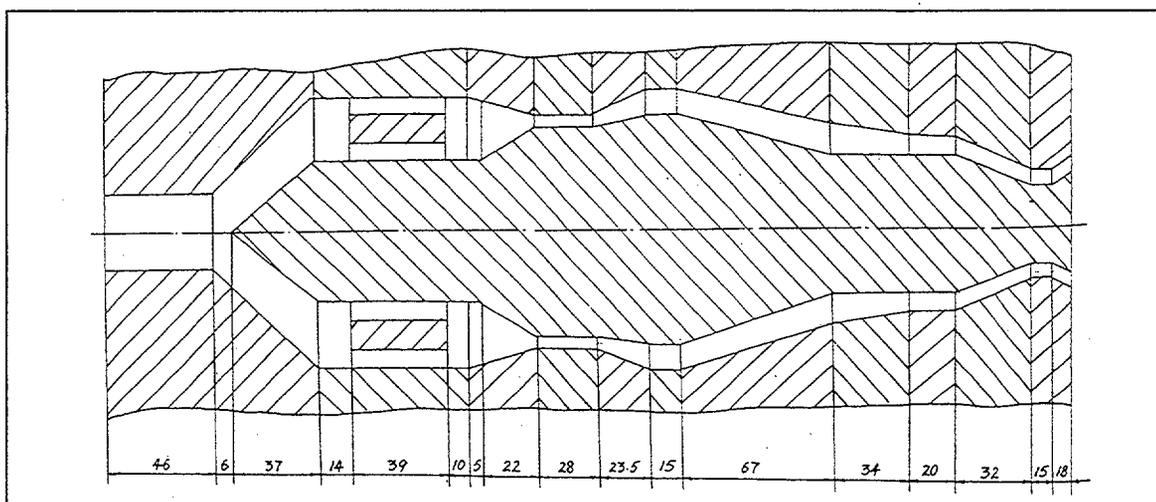


Fig. 12.1.- Cabezal de soplado

El parámetro que analizaremos en este ejemplo será la presión. A efectos de identificar en los gráficos cada caso la leyenda indica lo siguiente:

- **Numérico:** Resultados obtenidos con el método numérico de DIEPLAST con la opción de temperatura constante al realizarse de esa manera el resto de las pruebas .
- **J Sun:** Resultados obtenidos por J Sun y compañía en su programa .
- **Representativa:** Resultados obtenidos por DIEPLAST con el método aproximado y que corresponde al de *viscosidades representativas*.
- **Analítico:** Resultados obtenidos al implementar en Mathcad las expresiones publicadas en *Plastics Extrusion Technology*.

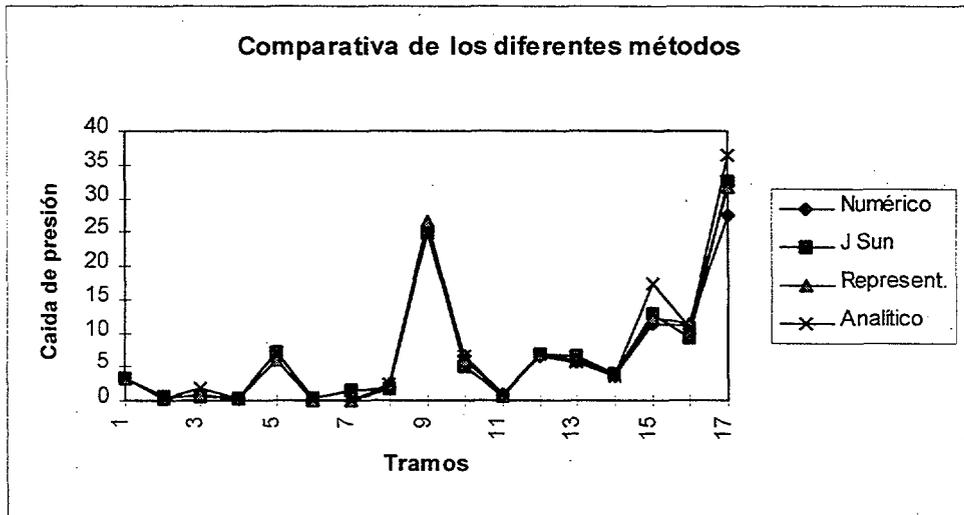


Fig.12.2.- Caída de presión en cada tramo

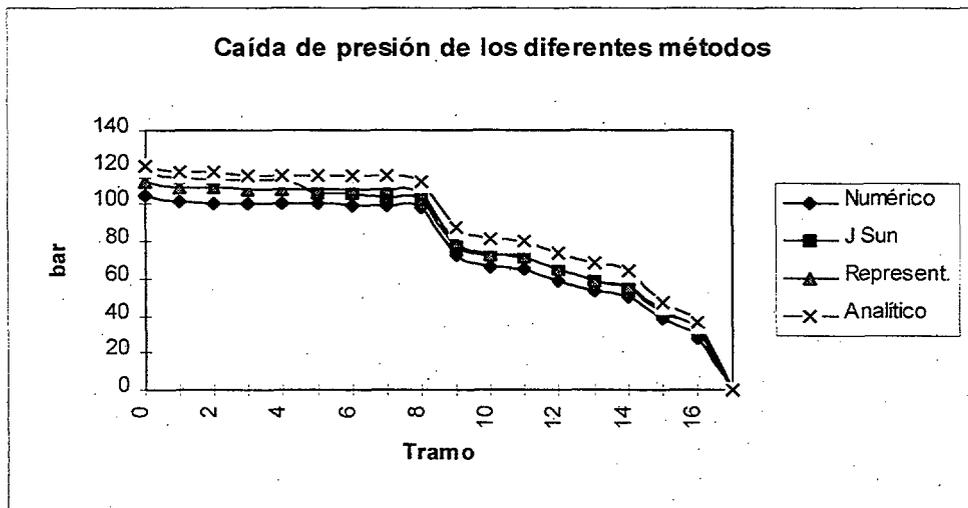


Fig.12.3.- Presión en todo el cabezal

Estudiando las curvas obtenidas podemos observar como en general existe una evolución de la presión similar en todos los casos, de tal manera que por ejemplo existen tramos que claramente condicionan la presión total; éstos son concretamente los tramos 9 y 17. Por otro lado existe una buena correlación entre DIEPLAST con sus dos métodos y el de J Sun, tan solo el obtenido a partir de las expresiones se aleja un poco más. No obstante las diferencias tampoco son demasiado apreciables a pesar de tratarse de diferentes métodos, obteniéndose para el método numérico de DIEPLAST una

presión total de 110.7 bar, para el método de viscosidades representativas también de DIEPLAST una presión de 118.7 bar (7% de error), para el programa de J. Sun una presión de 117.8 bar (6% de error) y para las expresiones en Mathcad una presión de 128.296 bar (16% de error).

En particular el ajuste con el programa de J.Sun lo podemos tomar como muy bueno ya que para otros parámetros tales como Velocidad de cizalla máxima y Tensión de cortadura máxima se obtienen unos valores de 450.66 s-1 y 4.15 bar respectivamente en el caso de DIEPLAST (método numérico) y en el caso de J.Sun unos valores de 453.97 s-1 (0.73 % de error) y 4.13 bar (0.5% de error).

Otra conclusión interesante es la buena correspondencia entre los dos métodos implementados en DIEPLAST, lo que hace que podamos utilizar uno como primera aproximación y cálculo rápido y el otro como cálculo más afinado y completo.

12.2.- Caso 2. Cabezal para tubos . Pruebas experimentales.-

Este ejemplo corresponde al trabajo desarrollado por Tseng, Han-Hsiu [2], Universidad de Massachusetts de Lowell en 1991 y en el que comparó un método teórico con unas pruebas experimentales que realizó sobre un cabezal para tubos y utilizando polietileno de alta densidad.

En dicho trabajo aplicó un método numérico (diferencias finitas) para estudiar el comportamiento del flujo en un cabezal con soporte o difusor tipo araña (Fig.12.2) y compararlo con medidas experimentales de presión que realizó mediante transductores que colocó en el cabezal.

El material utilizado tiene las siguientes características:

- Material: HDPE. GM 5010 T2
- Fabricante: Hoechst Celanese
- Calor específico: 3.0 kJ/kg^oK
- Densidad específica: 0.746 g/cm³ (medida a 220 °C)
- Conductividad térmica: 0.43 W/m^oK

Las propiedades viscosas del HDPE fueron determinadas en un reómetro capilar Instron y se obtuvieron diferentes valores de fuerza en relación con velocidades de bajada del piston. Obtenidas las curvas de viscosidad mediante un proceso de regresión llegó a una expresión logarítmica de la curva que luego utilizaría para realizar los cálculos. Es en este punto donde hemos realizado una variación con respecto a los datos de partida de Tseng y es que al trabajarse en las pruebas de extrusión experimentales a bajas velocidades de cizalla con su curva se obtienen valores de viscosidad algo superiores que los obtenidos en el reómetro. Es por ello que para acercarnos más a la realidad se ha efectuado otro ajuste con un total de 4 puntos en el programa Mathcad y utilizando los modelos de Carreau y el de Ostwald deWaele. Dichos puntos han sido obtenidos de los resultantes de las pruebas en el reómetro.

La geometría la podemos ver en la tabla 12.2

| Tramo | Diámetro inicial inferior (mm) | Diámetro inicial superior (mm) | Diámetro final inferior (mm) | Diámetro final superior (mm) | Longitud (mm) |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| 1 | - | 35.36 | - | 25.4 | 33.2 |
| 2 | - | 25.4 | - | 25.4 | 63.88 |
| 3 | 1 | 25.4 | 50.8 | 73 | 45 |
| 4(soporte) | 50.8 | 73 | 50.8 | 73 | 47.42 |
| 5 | 50.8 | 73 | 22.86 | 30.23 | 108 |
| 6 | 22.86 | 30.23 | 22.86 | 30.23 | 54.56 |

Tabla 12.2

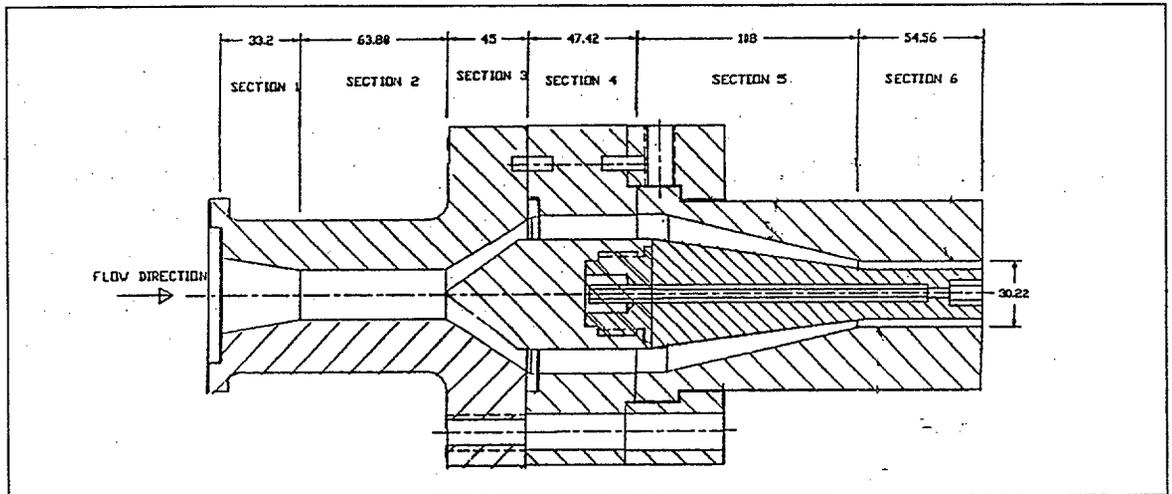


Fig. 12.4.- Cabezal de tubos utilizado para pruebas

Para realizar el estudio comparativo se han tomado dos puntos, uno situado a 48mm de la salida donde Tseng ubicó una sonda de presión y el otro que suministra la presión total en el cabezal que aunque Tseng no menciona exactamente a que punto corresponde supondremos que es a la entrada de acuerdo a la geometría que nos facilita.

Tseng realizó diferentes ensayos a diferentes temperaturas de pared del cabezal y con diferentes producciones. No obstante antes de entrar en los análisis de los resultados hemos de comentar lo siguiente:

- 1.- Tseng indica que la temperatura en todas las zonas del cabezal es constante y será la tomada como dato de entrada. Desconocemos si esta circunstancia es aproximada o no a la temperatura que podemos considerar como de pared.
- 2.- La temperatura de masa de entrada va a ser la misma que la de pared.
- 3.- El modelo reológico utilizado por Tseng tiene un cierto error con los puntos que él mismo indica para cizallas pequeñas .

Hacemos estas salvedades para indicar que nuestro estudio se hace partiendo de unos datos suministrados por Tseng que posiblemente son aproximados a la realidad pero no sabemos en qué grado.

En la tabla 12.3 vemos la comparación entre los resultados de Tseng y los de DIEPLAST para diferentes temperaturas de pared y que se refieren a la presión en el punto de la sonda situada a 48 mm de la salida en relación con la producción. Se muestran los resultados *experimentales* de Tseng en relación con DIEPLAST utilizando por un lado el modelo de *Carreau* y por otro el modelo de *Ostwald deWaelle*. Podemos observar como la elección del modelo influye algo en el resultado al no ser curvas coincidentes en todo el rango de trabajo y de ahí la importancia de disponer de unos buenos datos reológicos para hacer posteriormente un buen ajuste. Se indican los porcentajes de error resultantes en relación con los experimentales. Vemos claramente una mayor correspondencia utilizando el modelo exponencial dándonos un error

máximo del 14.8 % y un mínimo del 0.08 %. En cambio con el modelo de Carreau el error aumenta a un máximo de 23.9 % y mínimo de 1.8 %.

| T ^a (°C) | kg/h | Exper. Tseng | Dieplast (Carreau) | Error (%) | Dieplast (Ostwald) | Error (%) |
|---------------------|------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| 200 | 2.4 | 20.46 | 22.45 | 9.7 | 21.33 | 4.2 |
| 200 | 3.5 | 24.83 | 28.01 | 12.8 | 26.1 | 5.1 |
| 200 | 4.8 | 26.9 | 33.33 | 23.9 | 30.89 | 14.8 |
| 220 | 2.4 | 18.62 | 18.96 | 1.8 | 18.45 | -0.91 |
| 220 | 3.5 | 22.3 | 23.94 | 7.3 | 22.58 | 1.2 |
| 220 | 4.8 | 25.52 | 28.73 | 12.6 | 26.73 | 4.7 |
| 240 | 2.4 | 16.55 | 16.16 | -2.4 | 16.20 | -2.1 |
| 240 | 3.5 | 20 | 20.64 | 3.2 | 19.82 | -0.9 |
| 240 | 4.8 | 23.45 | 24.95 | 6.6 | 23.47 | 0.08 |

Tabla 12.3.- Presiones en la sonda situada a 48 mm de la salida. Resultados experimentales

En las figuras 12.5 y 12.6 vemos un análisis de la presión total, es decir, a la entrada. Se muestran las pruebas experimentales (Fig 12.6) y teóricas (Fig.12.5) desarrolladas por Tseng en relación con DIEPLAST. Con el proceso teórico de Tseng se muestra una mayor concordancia (error máximo de 6.83 % y mínimo de 0.016 %) principalmente porque al igual que DIEPLAST las hipótesis de partida son similares. En cambio el error aumenta con respecto a las pruebas experimentales (error máximo de 29.4 % y mínimo de 5 %), lo que cabía esperar dadas las hipótesis simplificadoras tenidas en cuenta así como los datos de partida (incluida curva de viscosidad) que no coinciden estrictamente con lo real. La mayor parte del error en términos porcentuales viene dado por el último tramo que es donde la sección de salida es menor y la caída de presión crece considerablemente.



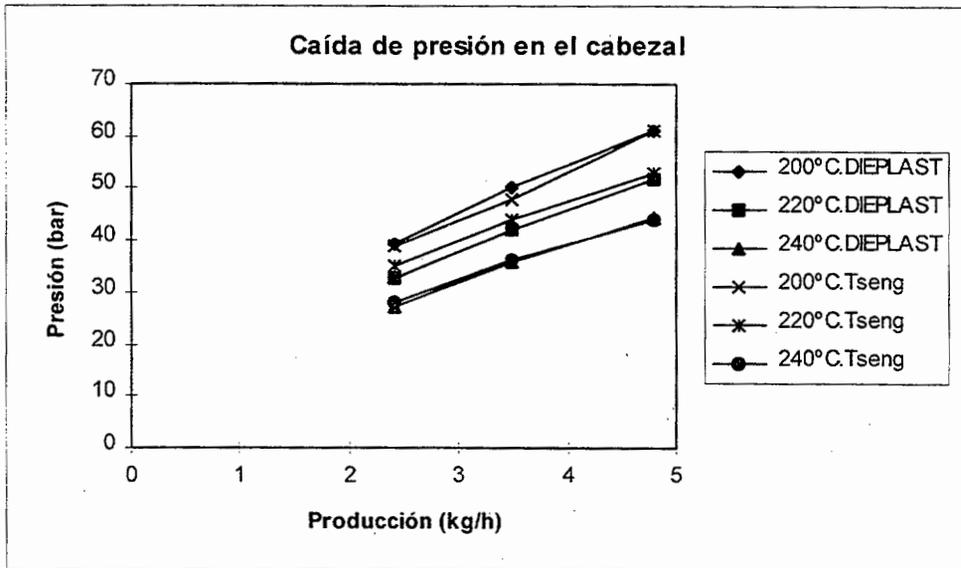


Fig. 12.5.- Pruebas teóricas de Tseng. Presión total.

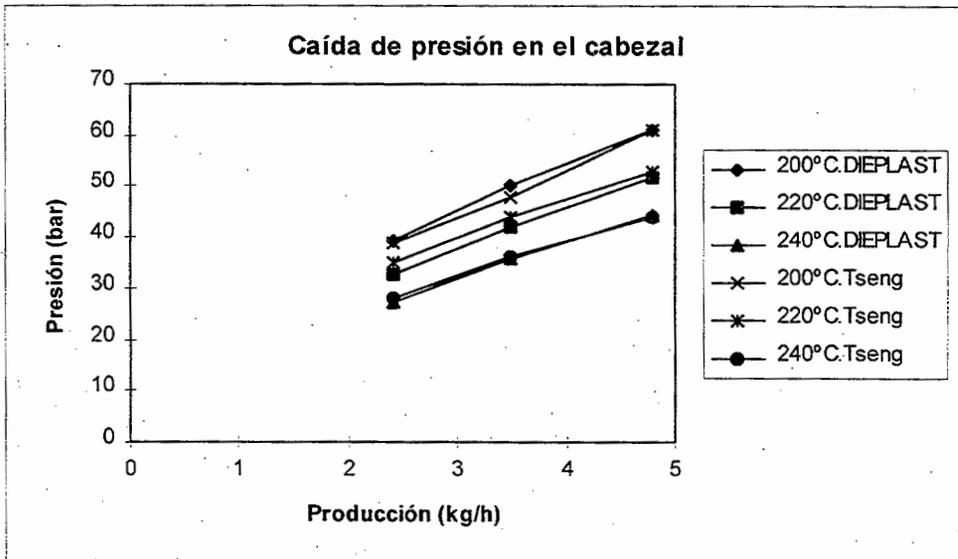


Fig. 12.6.- Pruebas experimentales de Tseng. Presión total.

Como conclusión de este ejemplo podemos decir que en general el resultado es satisfactorio y que independientemente de las hipótesis de partida que podrán ser mas o menos cercanas a la realidad nos damos cuenta la importancia que tiene el efectuar un buen modelo reológico que determine la curva de viscosidad. Con este mismo caso se puede proponer el realizar una prueba en el reómetro con este material y teniendo en cuenta todas las correcciones necesarias (Bagley y Rabinowisch) que nos dé una curva de viscosidad más fiable que la utilizada.

12.3.- Caso 3.- Ejemplo del programa DEFORM (PROWEX, IKV).-

En este caso se efectuará una verificación de DIEPLAST en relación al programa DEFORM que pertenece al paquete comercial PROWEX, desarrollado por el IKV [47] y que ya comentamos en el apartado 2.

El ejemplo se realiza con un canal anular sencillo utilizando como material LUPOLEN 1810H con una producción de 200kg/h. La única salvedad importante a comentar se refiere a que en este caso implementado en DEFORM existe una temperatura variable en la pared del canal por tramos entre 220 y 240 °C y también variable en la temperatura de masa de entrada entre 210 y 220 °C. Esta posibilidad permitida por DEFORM no ha sido contemplada en esta versión por DIEPLAST que supone una temperatura constante a la entrada y otra constante en la pared. Para salvar esta dificultad se ha optado por dar como temperatura de entrada un valor medio de 215 °C y como temperatura de pared 230 °C. Esta circunstancia va a tener una cierta influencia en los resultados pero que no obstante nos servirá como elemento de comparación entre los dos programas.

Los datos del material LUPOLEN 1810H utilizados por DEFORM son:

- Constante A de Carreau (Pas) : 16800
- Constante B de Carreau (s) : 2.5
- Constante C de Carreau: 0.6
- Temperatura de referencia de parámetros (°C): 190
- Temperatura estandar (°C): -70
- Densidad (g/cm³): 0.79
- Temperatura de referencia de densidad (°C): 131
- Coefficiente de dilatación (1/°C): 0.00070
- Calor específico (kJ/kgK) : 1
- Conductividad térmica (W/mK) : 1

En la tabla 12.4 se muestran la geometría del canal estudiado y en la figura 12.7 el esquema del mismo.

| Tramo | Diámetro inicial inferior (mm) | Diámetro inicial superior (mm) | Diámetro final inferior (mm) | Diámetro final superior (mm) | Longitud (mm) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| 1 | 40 | 80 | 40 | 80 | 40 |
| 2 | 40 | 80 | 40 | 92 | 10 |
| 3 | 40 | 92 | 40 | 160 | 50 |
| 4 | 40 | 60 | 80 | 160 | 80 |
| 5 | 80 | 160 | 80 | 160 | 20 |
| 6 | 80 | 160 | 80 | 120 | 60 |
| 7 | 80 | 120 | 80 | 120 | 40 |

Tabla 12.4.- Geometría del canal. Ejemplo de DEFORM.

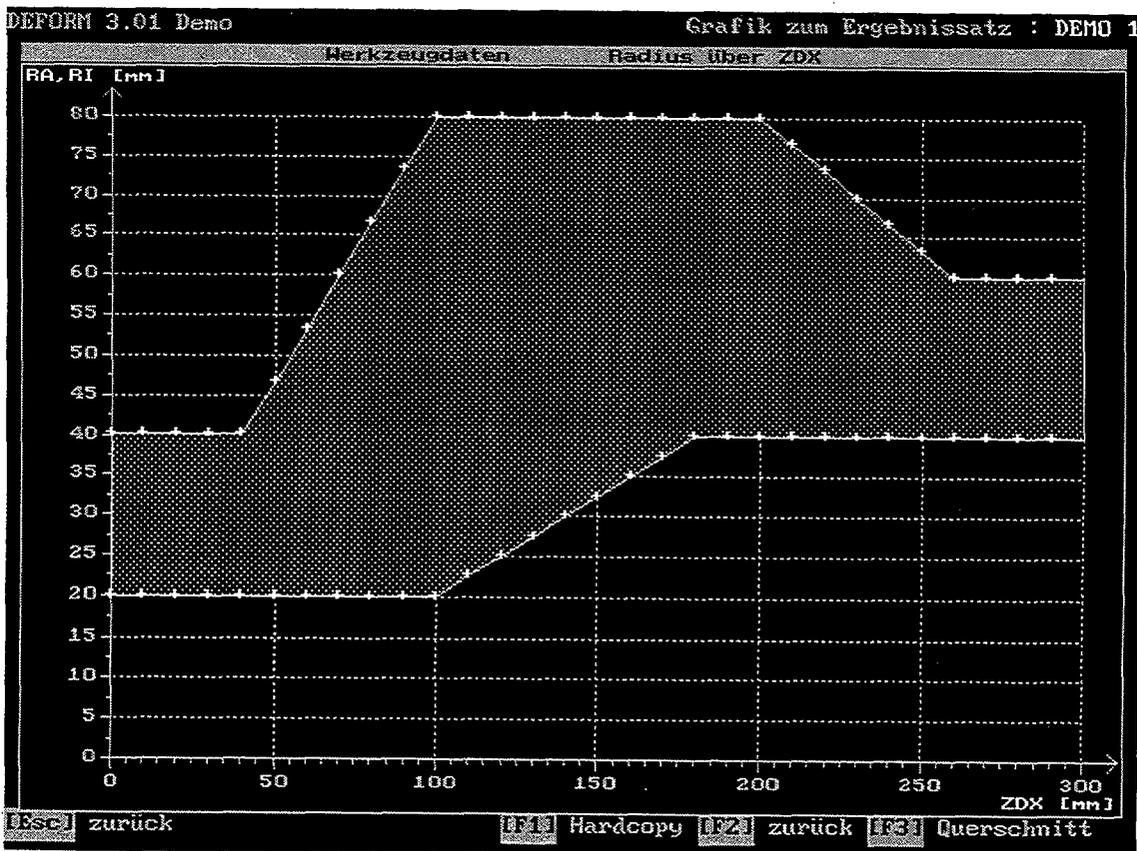


Fig. 12.7.- Canal de flujo. Ejemplo DEFORM.

Antes de mostrar los resultados comparativos en forma de gráficos indicar que en DEFORM (PROWEX) a efectos de los puntos en contacto con la pared se han tomado como valor de los parámetros los de un *punto intermedio entre el penúltimo y último nodo de la malla* en cada sección. Por lo tanto para que no haya discordancia en los puntos extremos en los valores de DIEPLAST haremos esta corrección. Así por ejemplo de acuerdo al modelo seguido la velocidad en la pared debe ser cero, de esta manera al no considerar exactamente la pared sino un punto próximo no será cero.

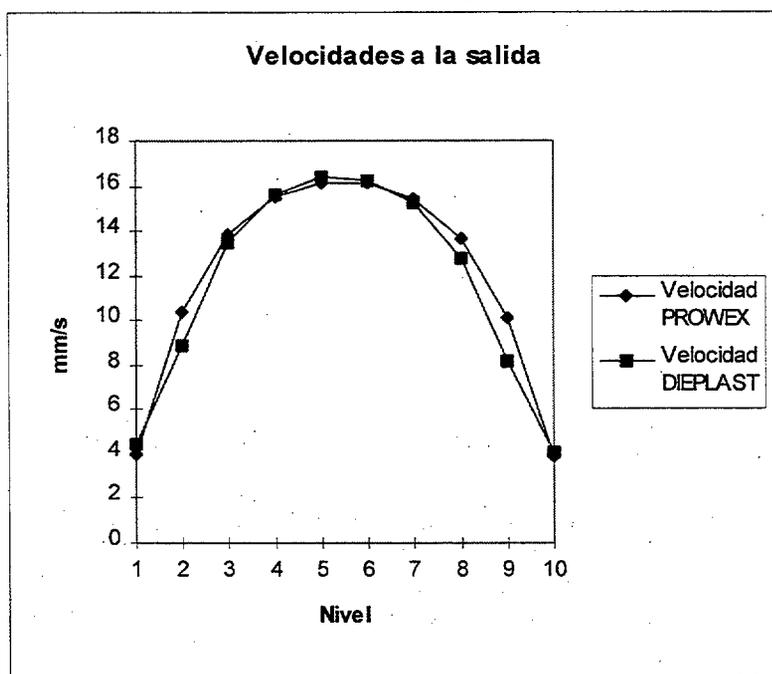


Fig. 12.8.- Velocidades a la salida. Puntos 1 y 10 cercanos a la pared.

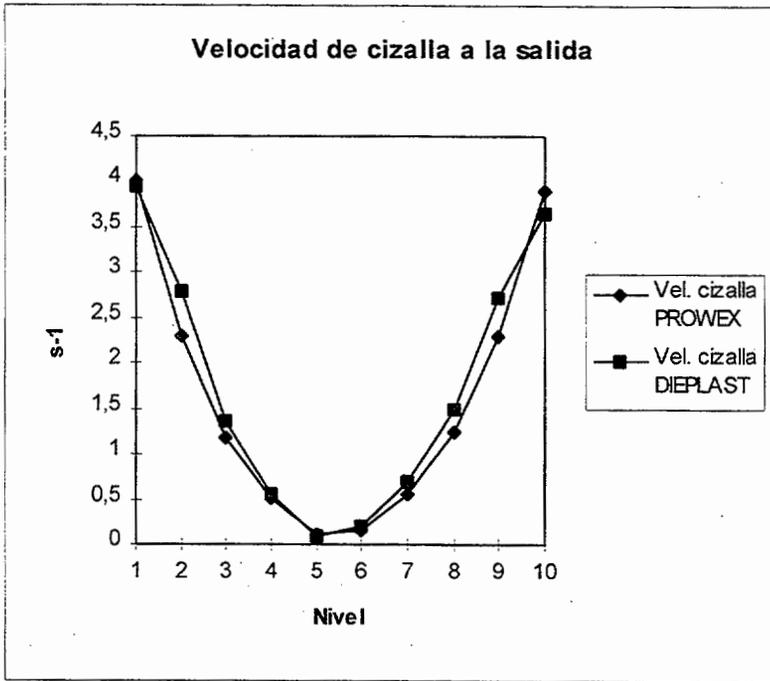


Fig. 12.9.- Vel. cizalla a la salida. Puntos 1 y 10 cercanos a la pared.

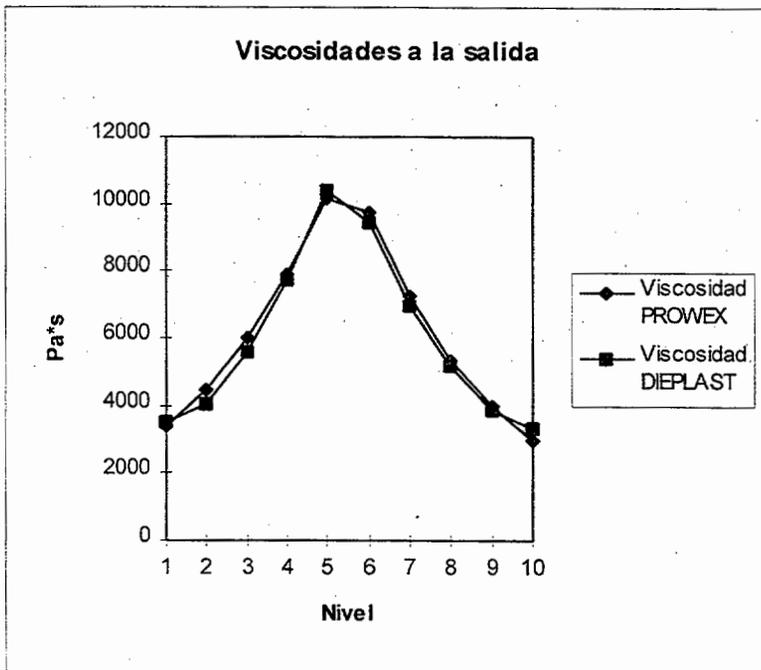


Fig. 12.10.- Viscosidades a la salida. Puntos 1 y 10 cercanos a la pared.

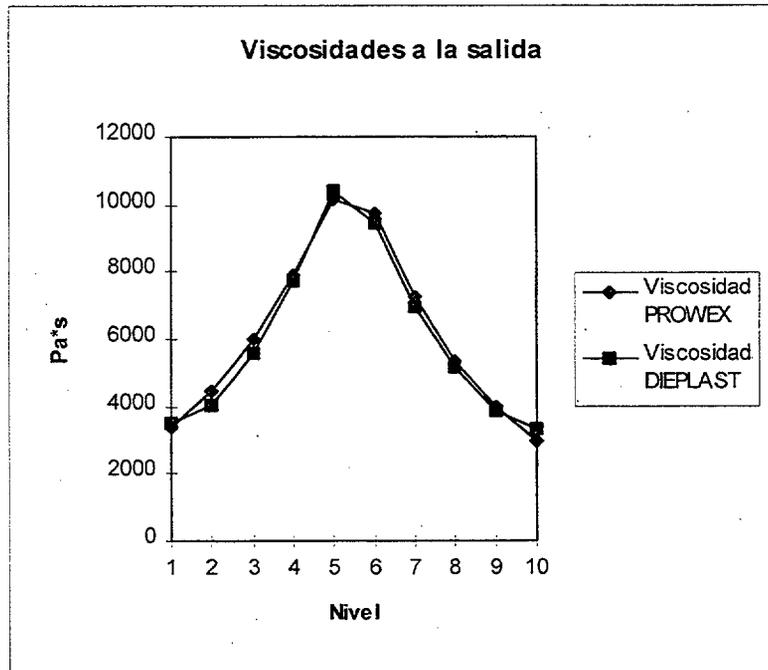


Fig. 12.11.- Tens. cortadura a la salida. Puntos 1 y 10 cercanos a la pared.

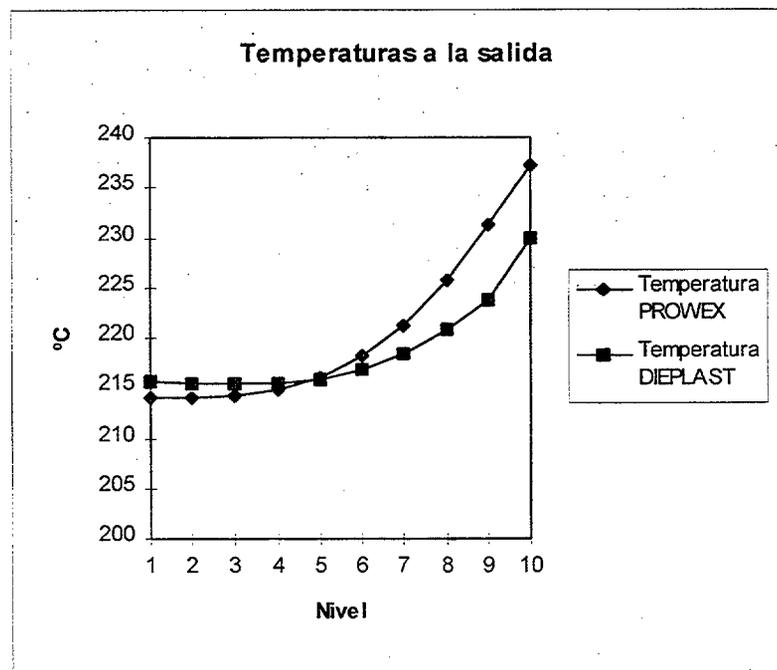


Fig. 12.12.- Temperaturas a la salida. Puntos 1 y 10 cercanos a la pared.

Los parámetros resultantes en ambos programas son muy similares en todos y cada uno de los puntos de la malla. Tan solo la temperatura presenta una cierta variación pero que como ya se dijo anteriormente las temperatura de pared y de entrada que se han tomado son valores medios al contrario que DEFORM que las tomo variables cada cierto tramo. En cualquier caso tanto en DIEPLAST como en DEFORM el mayor valor de temperatura ocurre en la pared interior del canal ya que la exterior se mantiene a una misma temperatura . También observamos que los mayores valores de velocidad de cizalla y tensión de cortadura se dan en la pared, lo que hay que controlar a efectos de no superar los límites admisibles.

Igualmente se comprueba una similitud entre los valores de presión resultante; en DEFORM la presión obtenida es de 2.24 bar y en DIEPLAST 2.21 bar (-1.34 %).

12.4.- Caso 4. Experiencias de Wortberg para determinar el factor de hinchamiento en geometrías tipo ranura.-

Una vez vistos diferentes casos donde hemos comprobado diversos parámetros de flujo pasamos a estudiar los que afectan a la deformación del extrusado. Para analizar la evolución de los métodos utilizados en DIEPLAST, con todas las consideraciones hechas en el apartado 11.4.4, veamos a continuación el primero de los casos. Se trata de una serie de cálculos y experiencias desarrolladas por Wortberg [33,35] por las cuales determinó numéricamente las *deformaciones reversibles* resultantes de un flujo a través de un canal tipo ranura de sección variable; de estas deformaciones reversibles obtenía la media a la salida del canal que es en definitiva la que definía el valor del *factor de hinchamiento teórico*. Por otro lado midió *experimentalmente* el valor resultante del factor de hinchamiento y que nosotros usaremos como elemento de verificación real.

Las pruebas de Wortberg fueron efectuadas con PS a temperaturas de 180 °C y 200 °C con diferentes producciones y con tres geometrías tipo ranura diferentes que mostramos en la figura 12.13. Dichas geometrías las llamaremos tipo 1, tipo 2 y tipo 3.

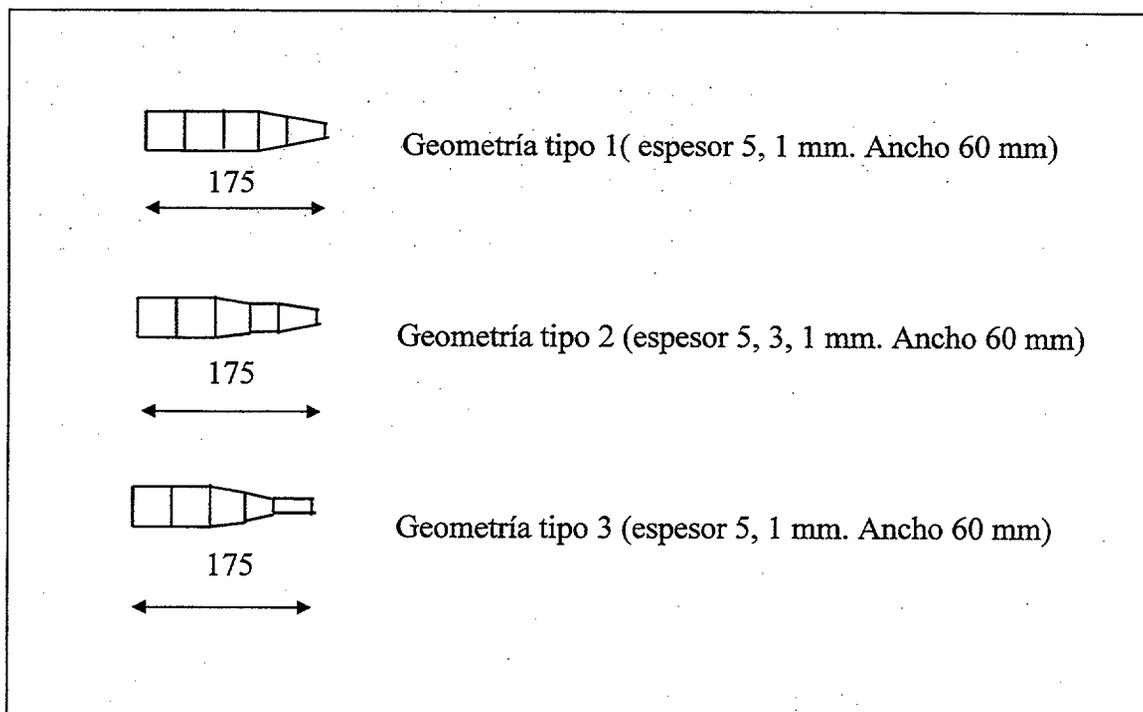


Fig. 12.13.- Geometrías tipo ranura de sección variable.

Todas las geometrías tiene el mismo espesor de salida, 1 mm, y de entrada, 5 mm, cambiando tan solo en la evolución de las secciones entre entrada y salida. Para los cálculos con DIEPLAST se ha empleado el material PS Dowstyron 678U. Las constantes de relajación para el PS suministradas por el IKV[47] a partir de trabajos de W y J son $C1=4375$ s $C2=3.015$ a 130°C .

En los gráficos podemos observar por un lado la evolución de las *deformaciones reversibles* medias a la salida (E_r) en función de los kg/h (para 180°C y 200°C) obtenidas por Wortberg y las obtenidas por DIEPLAST. Por otro lado vemos también gráficos en los que se representa la evolución del *factor de hinchamiento* (de espesor, B_h) con los kg/h (para 180°C y 200°C) de las experiencias de Wortberg y las de DIEPLAST con el método de Wortberg.

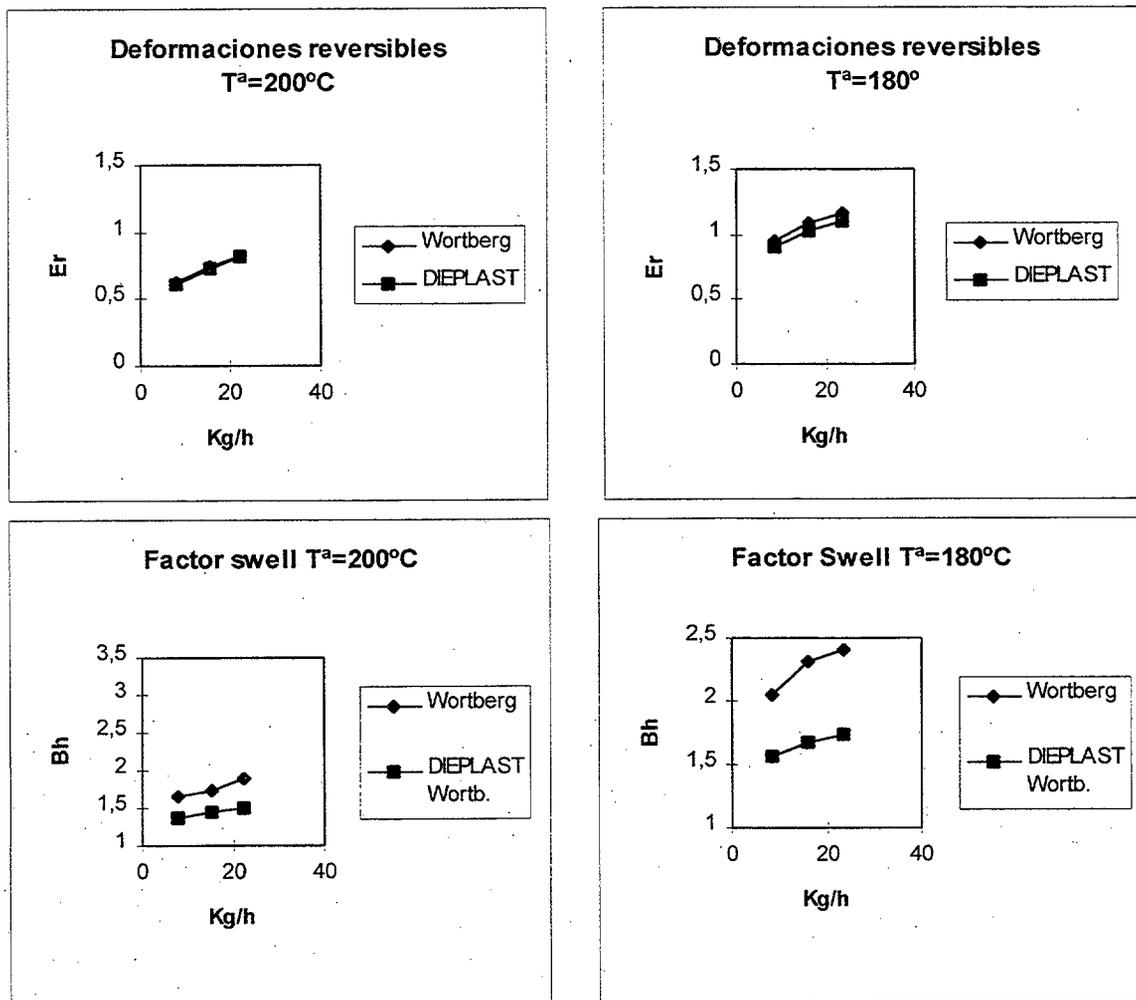


Fig. 12.14.- Deformaciones reversibles y factores de hinchamiento. Geometría tipo 1.

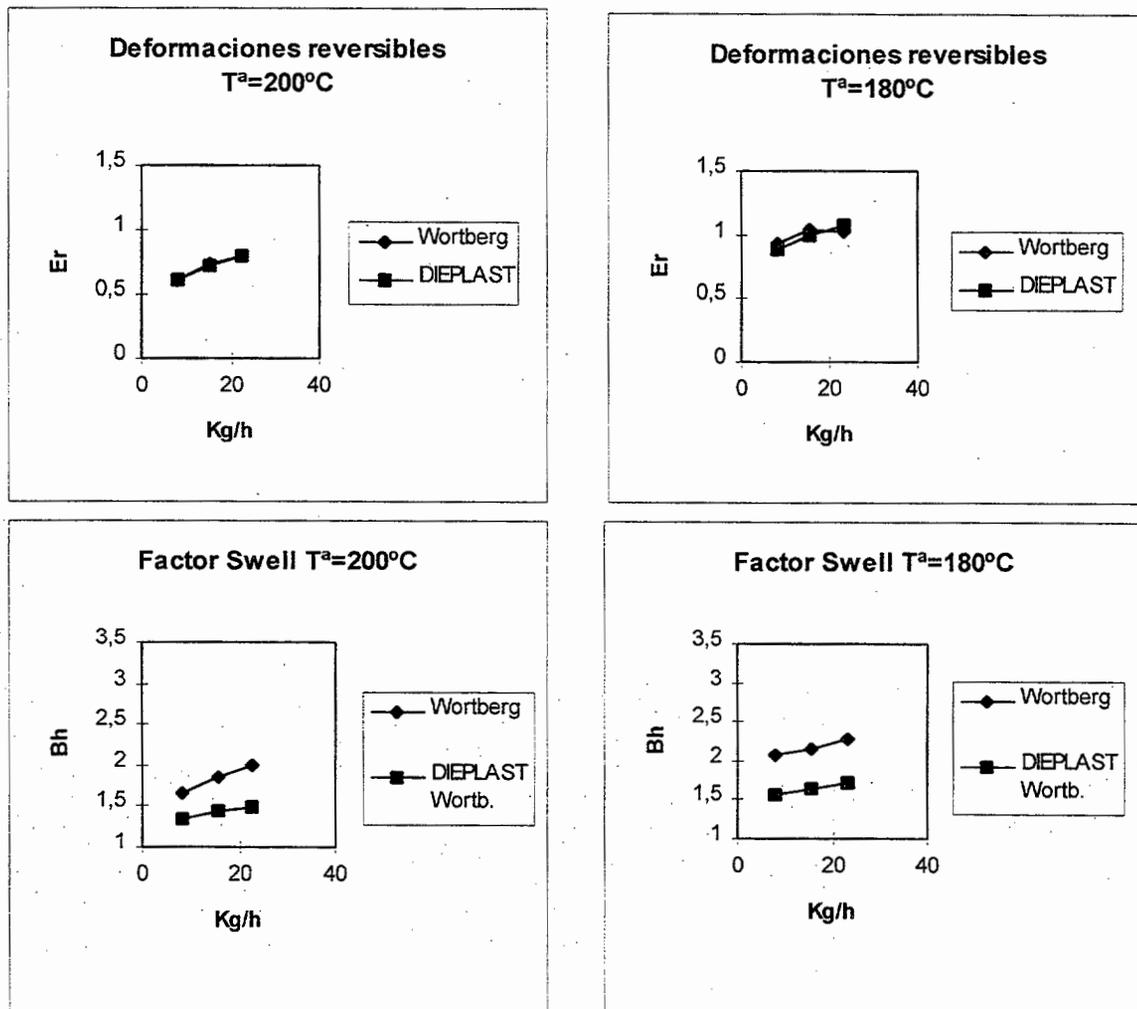


Fig. 12.15.- Deformaciones reversibles y factores de hinchamiento. Geometría tipo 2.

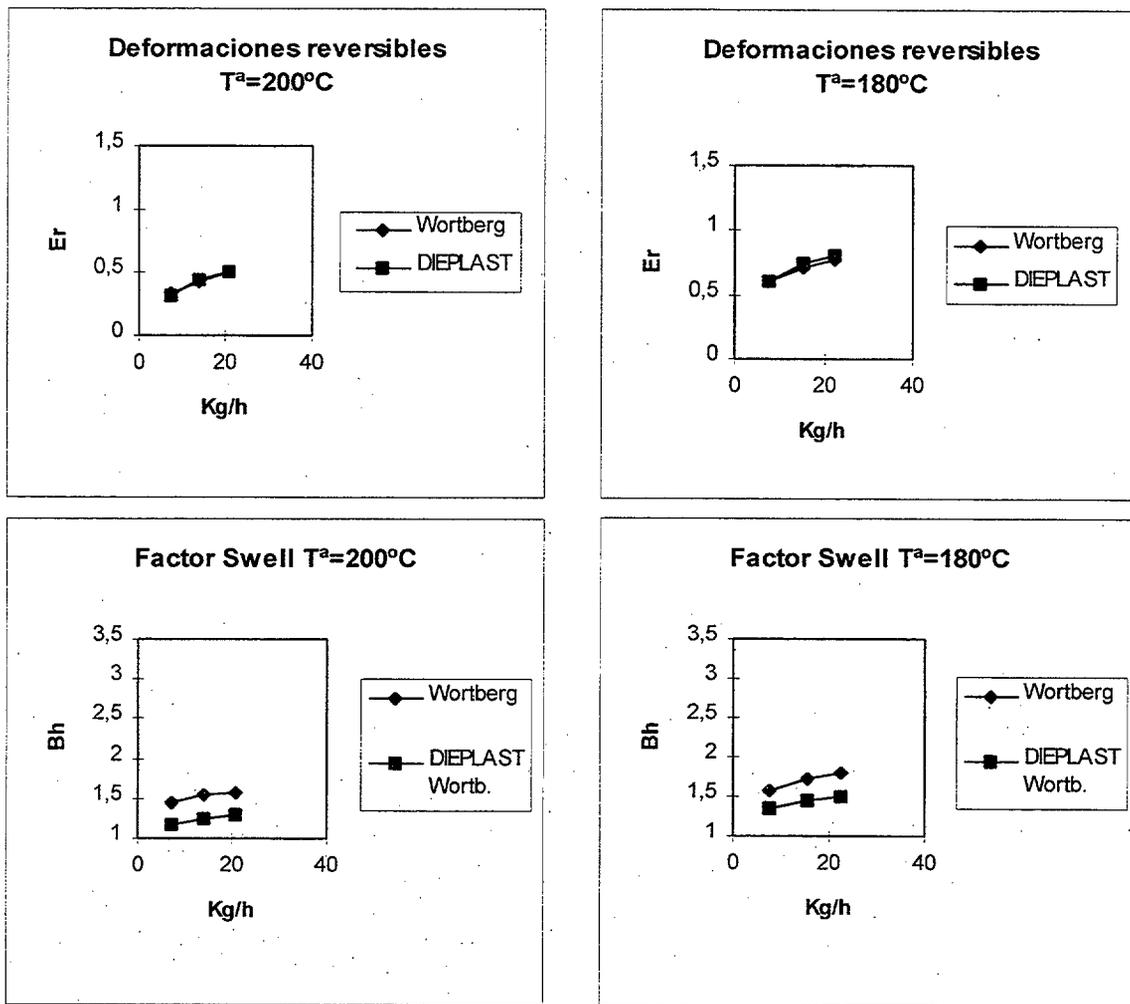


Fig. 12.16.- Deformaciones reversibles y factores de hinchamiento. Geometría tipo 3.

Observando los gráficos podemos sacar las siguientes conclusiones:

1.- En general las deformaciones reversibles medias de DIEPLAST y las de Wortberg coinciden muy bien lo cual es lógico ya que precisamente DIEPLAST aplica para su cálculo la metodología desarrollada por el propio Wortberg en compañía de Junk.

2.- Los valores experimentales de B_h son siempre superiores en relación a los de DIEPLAST con el método de Wortberg. Esto se debe a que en el programa DIEPLAST por defecto se toma la hipótesis de comportamiento isotrópico en la dirección del espesor y del ancho. Dicha suposición implica que $\bar{K}=K^*=0.5$ (ver apartado 11.4.2), lo que efectivamente no ocurre. Según los resultados de Wortberg y si suponemos que todo el hinchamiento se debe a deformaciones reversibles (hecho que sabemos que no es cierto) el valor de K oscila por ejemplo en la geometría tipo 1 entre 0.74 y 0.81 , dando un valor medio de $0.77 > 0.5$.

4.- El método utilizado muestra una tendencia correcta del factor de hinchamiento pero sin duda para un mejor reflejo de la realidad se hace necesario el ajustar los parámetros de partida y ello solo se puede hacer mediante ensayos (a efectos de parámetros de material los factores a y b requieren de un buen ajuste).

12.5.- Caso 5. Experiencias de N. Orbey y J.M. Dealy [38] para determinación del factor de hinchamiento en geometrías anulares.-

Comentan N. Orbey y J.M. Dealy en un trabajo publicado en Polymer Engineering and Science en 1984 sobre la dificultad de estimar el factor de hinchamiento mediante modelos teóricos bien de carácter simple basados en la teoría de elasticidad o de carácter numérico ya que tienen diferentes inconvenientes. De hecho este es un aspecto que hemos podido comprobar durante la realización de este trabajo. En este contexto Orbey y Dealy diseñaron un experimento para determinar el factor de hinchamiento de espesor y de diámetro en geometrías de tipo *anular*. Utilizaron un total de cuatro formas diferentes similares tan solo en lo que al espesor de salida se refiere (Fig. 12.17).

El experimento básicamente consistía en extruir el material (HDPE) a través de estas secciones pero cuidando muy mucho que las condiciones a la salida no alteraran los resultados. Esto último se consiguió haciendo que al salir el extrusado se encontrara con un *baño de aceite* a temperatura y densidad similares a la del polímero en cuestión en las condiciones de trabajo. De esta forma se evitaba la influencia de factores externos (enfriamiento a temperatura ambiente, gravedad) que modificaran las medidas. Dado que el extrusado es un tubo, para poder medir no solamente diámetro sino además espesor se utilizó un material transparente. La medición se efectuó realizando fotografías a intervalos regulares lo cual permitió medir tanto las dimensiones justo a la salida como una buena parte del proceso de relajación.

Una de las resinas empleadas fue un HDPE 22A Sclair 59A de Du Pont Canada, con una densidad de 0.960 g/cm^3 a $170 \text{ }^\circ\text{C}$. En el trabajo publicado podemos observar otros parámetros como curvas de viscosidad, de tensiones normales principales, etc. A partir de los datos de la curva para poder implementarla en DIEPLAST se realizó un ajuste obteniendo los parámetros de Carreau, $A=16040$, $B=0.376$, $C=0.76$ a una temperatura de 170°C . Las constantes de relajación para el HDPE según aparecen en el trabajo de Junk [3] son $C1=5142 \text{ s}$ $C2=3.1$ a 170°C .

Los canales utilizados los podemos describir como sigue:

- Canal anular de sección recta constante.
- Canal anular de sección divergente a la salida .
- Canal anular de sección convergente a la salida con un ángulo de 10° .
- Canal anular de sección convergente a la salida con un ángulo de 20° a la salida.

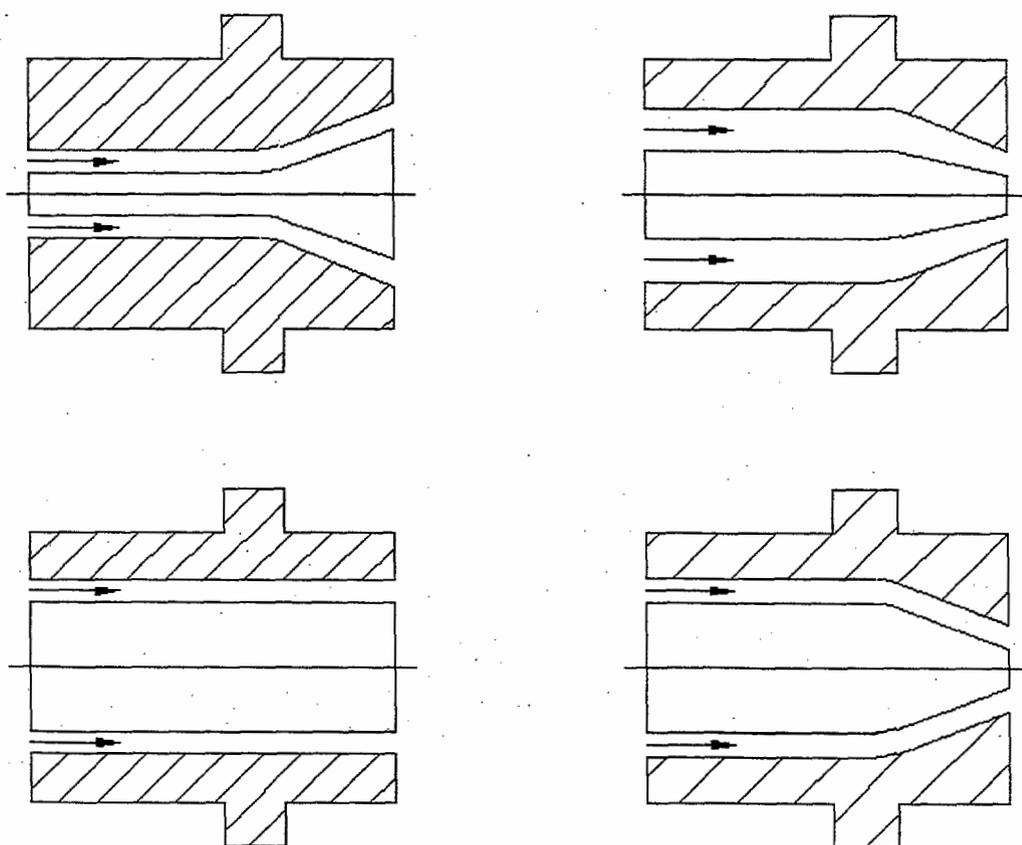


Fig. 12.7.- Canales experimentados por Orbey y Dealy.

Se efectuaron un total de 3 ensayos de diferentes caudales con cada tipo de canal siendo los *factores de hinchamiento de diámetro* (de equilibrio) obtenidos por O y D los mostrados en la tabla 12.5

| Cm3/s | kg/h | Geometría | Factor de hinchamiento |
|--------------|-------------|------------------|-------------------------------|
| 0,5 | 1,728 | Recta | 1,54 |
| 1 | 3,456 | Recta | 1,7 |
| 2 | 7,2 | Recta | 1,75 |
| 0,5 | 1,728 | Divergente | 1,2 |
| 1 | 3,456 | Divergente | 1,23 |
| 2 | 7,2 | Divergente | 1,25 |
| 0,5 | 1,728 | 10° convergente | 2,34 |
| 1 | 3,456 | 10° convergente | 2,45 |
| 2 | 7,2 | 10° convergente | 2,6 |
| 0,5 | 1,728 | 20° convergente | 2,37 |
| 1 | 3,456 | 20° convergente | 2,55 |
| 2 | 7,2 | 20° convergente | 2,64 |

Tabla 12.5.- Factores de hinchamiento según pruebas de Orbey y Dealy

Los resultados en DIEPLAST aparecen en la tabla 12.6 junto con el error cometido en cada prueba. En el gráfico vemos la comparación entre las experiencias y DIEPLAST.

| Cm3/s | kg/h | Geometría | DIEPLAST Wortb. | % error |
|--------------|-------------|------------------|------------------------|----------------|
| 0,5 | 1,728 | Recta | 1,61 | 4% |
| 1 | 3,456 | Recta | 1,67 | -2% |
| 2 | 7,2 | Recta | 1,72 | -2% |
| 0,5 | 1,728 | Divergente | 1,12 | -7% |
| 1 | 3,456 | Divergente | 1,14 | -8% |
| 2 | 7,2 | Divergente | 1,16 | -8% |
| 0,5 | 1,728 | 10° convergente | 2,39 | 2% |
| 1 | 3,456 | 10° convergente | 2,48 | 1% |
| 2 | 7,2 | 10° convergente | 2,57 | -1% |
| 0,5 | 1,728 | 20° convergente | 2,16 | -10% |
| 1 | 3,456 | 20° convergente | 2,23 | -14% |
| 2 | 7,2 | 20° convergente | 2,32 | -14% |

Tabla 12.6.- Factores de hinchamiento según DIEPLAST

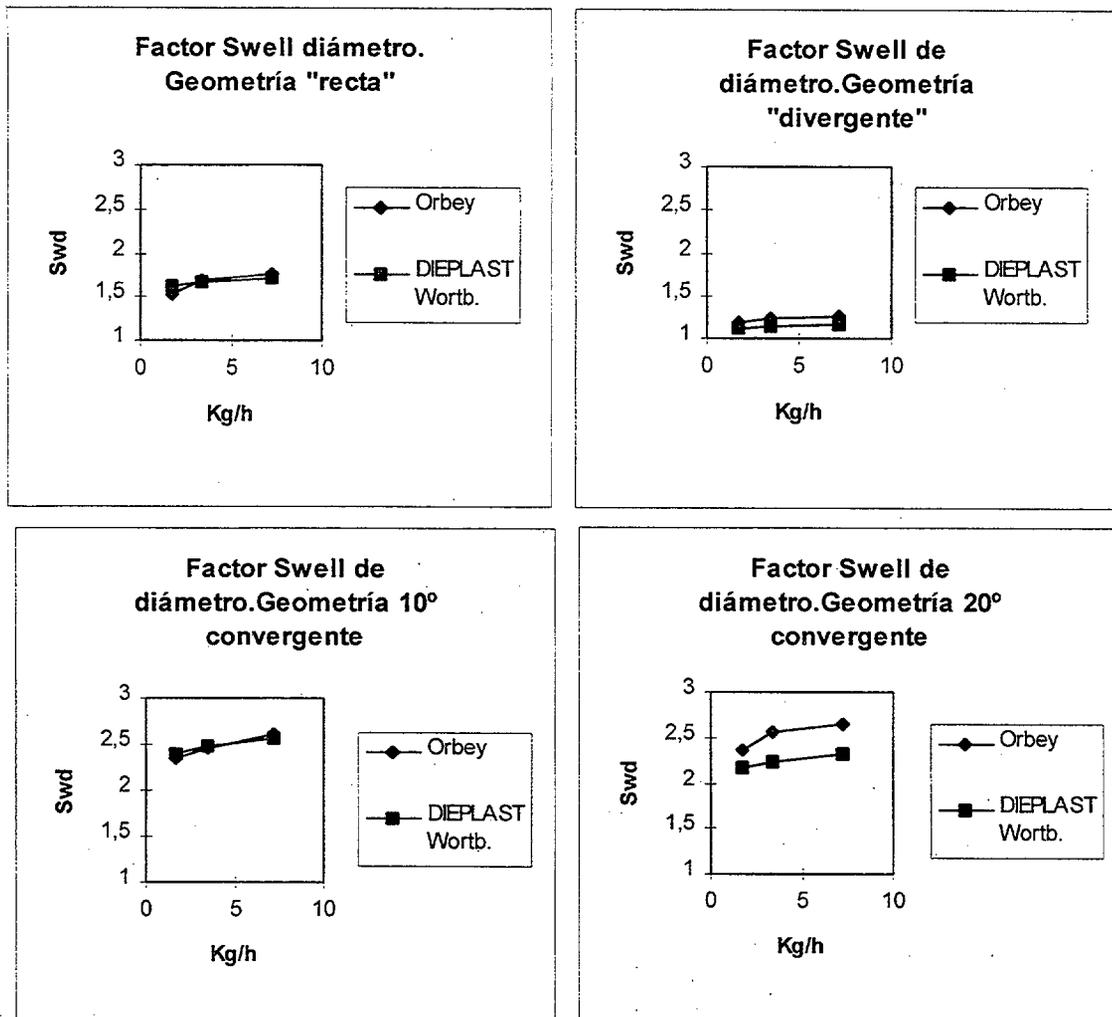


Fig. 12.8.- Comparación de Orbey con DIEPLAST

Las conclusiones que podemos sacar de este ejemplo son realmente muy interesantes. En primer lugar observamos como existe en general una buena correlación entre los resultados experimentales y los de DIEPLAST. Distingamos caso por caso:

a) Geometría recta. La concordancia es bastante aceptable y ello es debido principalmente a que de sus ensayos Orbey y Dealy sacaron como conclusión que el comportamiento de este caso es isotrópico, es decir, a efectos de nuestro método $k=k^*$. Recordemos que el suponer $k=k^*$ es la norma general en DIEPLAST. Lo interesante de este hecho es que eso nos permite cubrir un amplio abanico de cabezales cuya geometría termina con este tipo de sección; recordemos los de fabricación de tubos donde siempre existe una zona de relajación final como ésta.

b) Geometría divergente. También con resultados bastante aceptables. No obstante no es un caso isotrópico pues justamente es uno de los que DIEPLAST contempla como no isotrópico como norma general, tomando el factor k que afecta al S_w (de espesor) con un valor de $1/1.33$, lo que indica que el factor de hinchamiento del espesor es mayor que el de diámetro. Esta idea no es gratuita sino que también pudo ser comprobado por Orbey y Dealy a partir de estudios de Henze and Wu [38]. En cualquier caso independientemente del valor dado a k y k^* conocemos unos márgenes amplios en los que se mueve el factor de hinchamiento al ser $k+k^*=1$.

c) Geometría convergente 10° . Coinciden de manera significativa con los de DIEPLAST dado que la condición isotrópica considerada también es comprobada por Orbey y Dealy.

d) Geometría convergente 20° . La coincidencia es menor ya que es un ejemplo claramente no isotrópico y por eso difiere de DIEPLAST. No obstante es interesante comprobar como con un pequeño ajuste de k habría mayor correlación.

Como resumen de este caso estudiado decir que en general la evolución de los S_w es correcta y que según que geometría incluso sus valores numéricos se acercan a los reales.

12.6.- Caso 6. Comparación de factor de hinchamiento obtenido mediante el método de Tanner en DIEPLAST con el estudio numérico de E. Mitsoulis , J. Vlachopoulos y F. A. Mirza.-

En un estudio elaborado por E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos y F. A. Mirza [41] se utilizó un programa de elementos finitos de propósito general para simular el flujo de un Poliestireno a través de una canal rectangular tipo ranura como muestra la figura 12.9. La particularidad de este canal es que tiene un transición brusca desde una sección amplia a una estrecha. No es un caso representativo a efectos de diseño de cabezales ya que no es habitual estas brusquedades en las secciones que pueden producir zonas de estancamiento y por tanto de quemadas ;sí es interesante desde el punto de vista genérico de estudio del proceso de flujo ya que tenemos diferentes efectos a estudiar (vortice, corrección de Bagley a la entrada y salida, evolución de la superficie libre a la salida,etc) y que solo lo podemos hacer con métodos potentes como el M.E.F. De todo el estudio de este trabajo nos centraremos tan solo en la previsión del factor de hinchamiento.

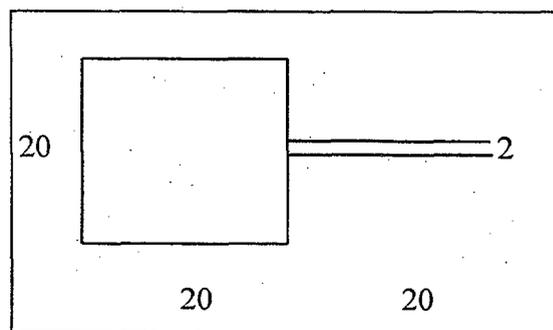


Fig.12.9.- Canal rectangular con salida tipo ranura

El estudio en DIEPLAST se realizó con poliestireno Dow styron 678U a 180°C y con unos parámetros de Carreau como sigue:

$$A= 9500 \text{ Pa}$$

$$B= 0.705 \text{ s}$$

$$C=0.534$$

$$T^a \text{ referencia}= 180^\circ\text{C}$$

El modelo seguido por Mitsoulis en el llamado modelo A es el de la ley exponencial con los siguientes valores:

$$k = 9500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$n = 0.38$$

En el trabajo de Mitsoulis aparecen diferentes modelos viscoelásticos de los cuales hemos sacado el A* al ser el más que se aproxima a las verificaciones experimentales de Huang () para el mismo ejemplo. El modelo A* tener en cuenta dos franjas a la hora de considerar la expresión para calcular la diferencia de tensiones normales principales (N_{1w}), de tal manera que según Huang y White [41]

$$N_{1w} = 3.47 \times 10^{-3} \times \tau_w^{1.66} \quad \text{Para } \dot{\gamma} \leq 20 \text{ s}^{-1}$$

$$N_{1w} = 1.40 \times 10^{-5} \times \tau_w^{2.18} \quad \text{Para } \dot{\gamma} > 20 \text{ s}^{-1}$$

Para poder comparar utilizando el mismo criterio en DIEPLAST se han calculado los números de Deborah (ver 11.4.3) a la salida para varios caudales y en cada caso los factores de hinchamiento que corresponden utilizando las expresiones analíticas de Tanner.

En la figura 12.10 podemos observar los valores de S_{wh} obtenidos en función del número de Deborah en los siguientes casos:

- * Modelo A* de Mitsoulis, Vlachopoulos y Mirza.
- * Resultados obtenidos por Crochet y Keunings [41] utilizando el modelo Olroyd-B.
- * Resultados experimentales de Huang y White [41].
- * Resultados de DIEPLAST con el método de Tanner.

Analizando los diferentes métodos podemos indicar que el modelo A* de Mitsoulis se adapta bastante bien a las pruebas experimentales de Huang (sobre todo

gracias a establecer dos tramos para el cálculo de $N1w$, lo que incluso permite un mayor número de Deborah sin inestabilidad). DIEPLAST muestra una evolución similar al resto de métodos en números de Deborah bajos y empieza a ser menor que las pruebas experimentales al aumentar éstos. Una limitación que todavía tienen los métodos numéricos en M.E.F. es la inestabilidad que aparece con número de Deborah altos; concretamente en este ejemplo a Mitsoulis le ocurre para valores mayores que 3.5 para el modelo A*.

En cualquier caso y a pesar de lo simple del método de Tanner nos sirve para tener una referencia al menos aproximada del factor de hinchamiento.

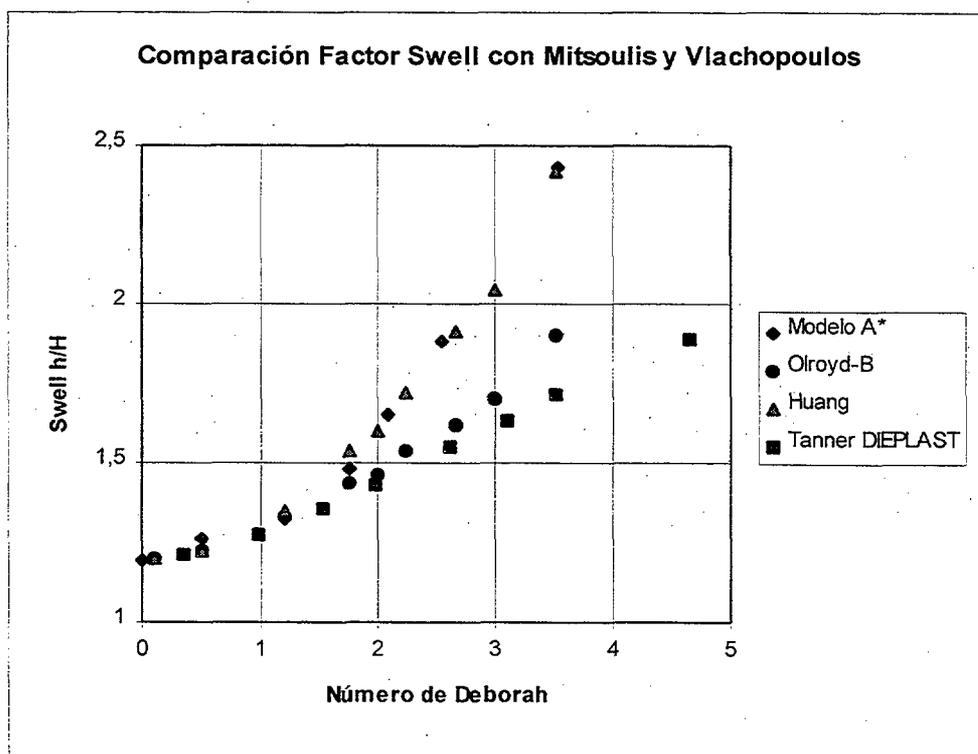


Fig. 12.10.- Factor de hinchamiento (swell) en función del número de Deborah

13.- OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL PROGRAMA "DIEPLAST" DESARROLLADO. ESTRUCTURA BÁSICA.-

13.1.- Objetivos y herramientas utilizadas.-

Cuando se han planteado los **objetivos** a cubrir es necesario partir de la premisa principal que no solamente se trata de definir una herramienta para efectuar el *análisis* de cabezales de extrusión sino también para su *diseño* en la dimensión que planteamos en el punto 6. Para ello se han establecido los siguientes objetivos principales:

- * Establecer una *metodología lógica* de trabajo que ayude al diseñador a plantear diferentes posibilidades y soluciones alternativas.
- * Ser una *herramienta fácil* de usar y orientada sobre todo a tecnólogos con gran experiencia práctica en los procesos de extrusión pero tal vez sin demasiados conocimientos sobre reología de polímeros. Para ello se debe proporcionar un entorno de trabajo en entorno Windows (3.1, 3.11, 95 o superior) amigable para el usuario , con ausencia de comandos y que prácticamente haga innecesario el uso de un manual para su manejo; con iconos gráficos e imágenes que facilitan el entendimiento de las diferentes opciones.
- * Primar la *practicidad* sobre un empleo de métodos muy sofisticados de cálculo.
- * Utilización de una *base de datos de materiales*, con todos los parámetros que los definen y fácil de modificar, ampliar, borrar, etc por parte del usuario; compatible con otras bases de datos del mercado.
- * *Integración* en un mismo programa de diferentes geometrías y tipologías de cabezales con posibilidad abierta al futuro de ampliación de nuevas formas.
- * *Diseño parametrizado* orientado al tipo de cabezal estudiado y con una rapidez de definición y modificación superior al diseño en programas estandard (Autocad,

Microstation,etc), no siendo necesario el conocimiento de estos. No obstante se deja un camino de intercambio de ficheros en formato DXF universal con cualquier programa.

- * Posibilidad de hacer multiples combinaciones con *diferentes tipos de difusores y distribuidores* que permitan abrir aún más el abanico de posibilidades y no centrarse de entrada en una única solución.
- * Ayudas de *orientación automática al diseño* durante la definición gráfica ,basada en la experiencia y con una amplia recopilación de diferentes autores.
- * *Definición automática de mallados*, posibilitando métodos para facilitar la convergencia de los resultados.
- * Rápida y sencilla introducción de datos de partida.
- * Cálculo de los diferentes *parámetros reológicos* (velocidades, velocidades de cizalla, tensiones de cortadura, presiones, viscosidades, temperaturas, deformaciones) que intervienen en la extrusión presentándolos en forma de tablas, curvas y gráficos de campo en todo el cabezal con espectro de colores.
- * Cálculo de los diferentes *factores de hinchamiento* y su evolución en forma de curvas.
- * Definición de *curvas características* del cabezal para encontrar punto de trabajo.
- * Establecimiento de *área de trabajo* en función de las restricciones impuestas.
- * *Síntesis* a la hora de analizar resultados, resumiendo los mismos en parámetros básicos que ayuden a tomar decisiones de forma comparativa.
- * *Gestión de ficheros* y almacenamiento de información *comoda y perfectamente estructurada*.

Los objetivos anteriores se consiguen en base a la utilización de una serie de *herramientas* y que establecen lo que sería el alcance de este programa:

- * El lenguaje de programación elegido y que combina una aceptable rapidez de cálculo con una muy buena presentación de menús e interfaces gráficas es el Visual Basic.

- * Los métodos de cálculo aplicados pueden ser de tipo analítico y aproximado o de tipo numérico, eligiendo el operario la opción deseada en cada momento. Cada tipo de difusor y distribuidor por sus características específicas tiene su propio método de cálculo. El método numérico implementado es el de diferencias finitas en condiciones isotermas o no isotermas. Para el método analítico se ha empleado el de “viscosidades representativas”

- * Para la estimación de los factores de hinchamiento se dan dos opciones diferentes de cálculo, modelo de Wortberg y Junk y el de Tanner.

- * En la base de datos de polímeros, compatible con Access, se permite el uso de hasta tres modelos viscosos diferentes, Carreau, Ostwald deWaelle, ecuación logarítmica de 6 coeficientes.

13.2.- Estructura básica.-

Tanto los objetivos como los alcances planteados anteriormente se han plasmado en un programa, llamado DIEPLAST, para lo cual se ha diseñado una estructura y una manera de trabajar con dicha estructura. La *estructura básica* la veremos a continuación y la *manera de trabajar* en el apartado 14.

Para explicar de una forma lo más sintética posible la estructura que se le ha dado al programa utilizaremos las pantallas más representativas del mismo, indicando en cada una de ellas las posibilidades que tienen dejando a un lado aquellas que no son tan relevantes.

Para seguir un orden coherente hemos condensado todas las opciones en siete acciones tal como muestra la figura 13.1. Seguiremos este esquema para realizar la explicación, utilizando como ejemplo el estudiado por Tseng Han-Siu () y que vimos en 12.2.

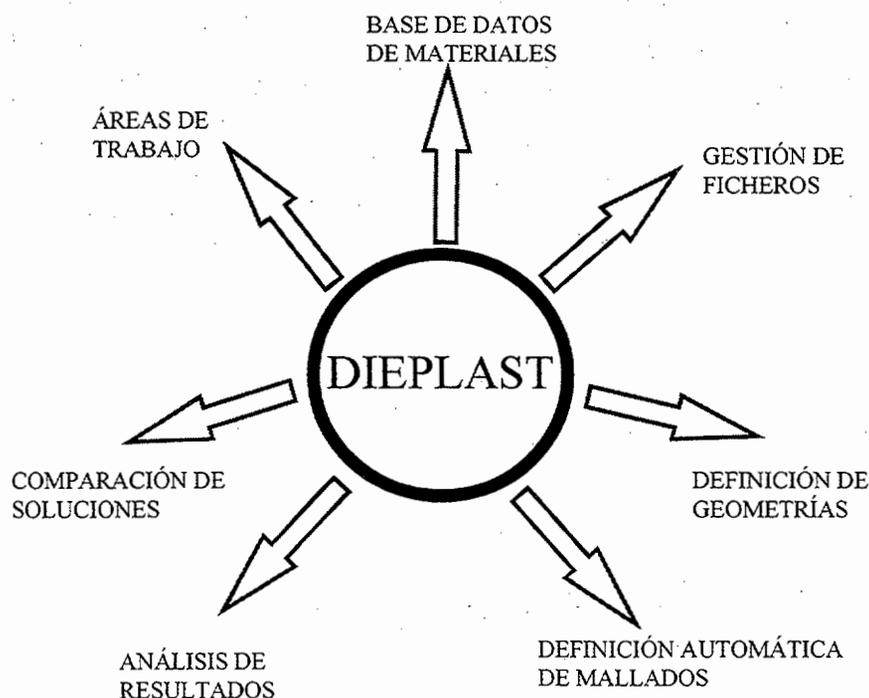


Fig.13.1.- Acciones principales

*** Base de datos de materiales**

La base de datos de materiales es accesible desde diferentes partes del programa para facilitar no solamente su consulta sino también su modificación, ampliación, eliminación de registros, etc. Su estructura es compatible con Access con lo cual podemos realizarla en programas específicos de base de datos externos a DIEPLAST. La búsqueda de cualquier material es muy sencilla bien desde lista desplegable o de forma secuencial mediante un control al efecto. Para cada material se muestran todos los parámetros que lo definen y que van a influir en todos los procesos de cálculo que se realicen. El no disponer de determinados parámetros no significa necesariamente la imposibilidad de efectuar un estudio del cabezal, así ocurre por ejemplo cuando no se dispone de datos viscoelásticos lo que no impide el análisis de otros aspectos (presión velocidad de cizalla, etc). Se dá la opción de seleccionar el modelo reológico que se desee. Los parámetros viscoelásticos introducidos pueden ser los necesarios para el modelo de Wortberg y Junk o los necesarios para el modelo de Tanner.

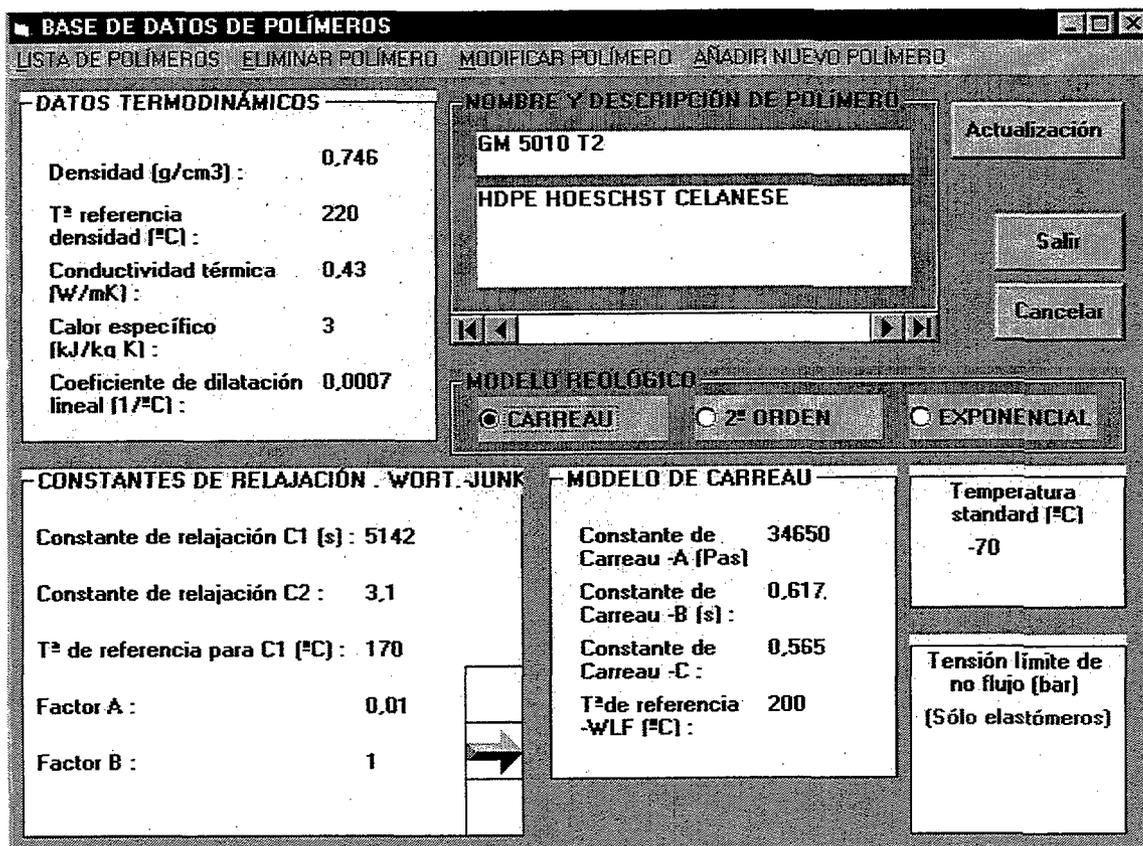


Fig. 13.2.- Base de datos de materiales.

*** Gestión de ficheros**

La estructura de ficheros diseñada, que veremos con mayor detalle en el punto 14, tiene un fácil acceso desde diferentes puntos del programa, realizando operaciones tales como grabado, grabado como, borrado, apertura, nuevo fichero. Tengamos en cuenta que podemos tener ficheros de proyecto (dentro de los cuales se encuentran las opciones), ficheros de geometrías y ficheros de resultados.

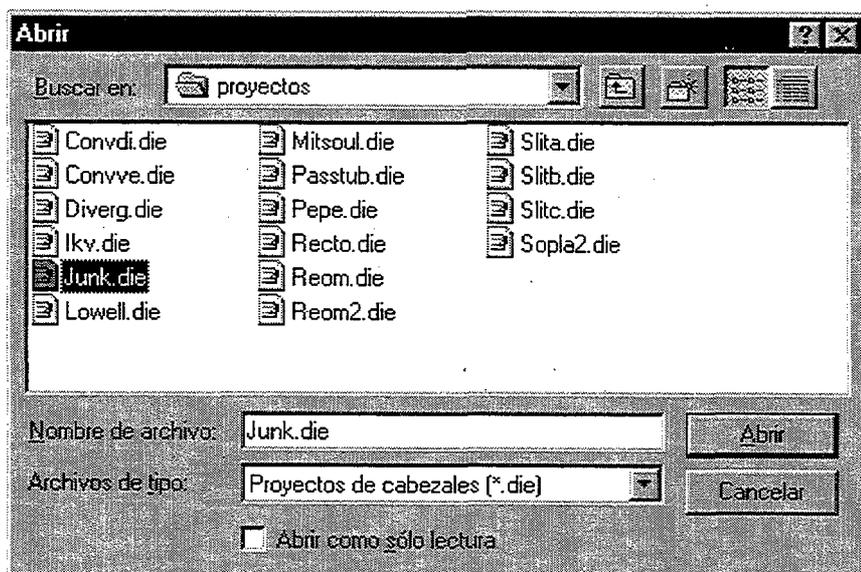


Fig. 13.3.- Gestión de ficheros de proyectos

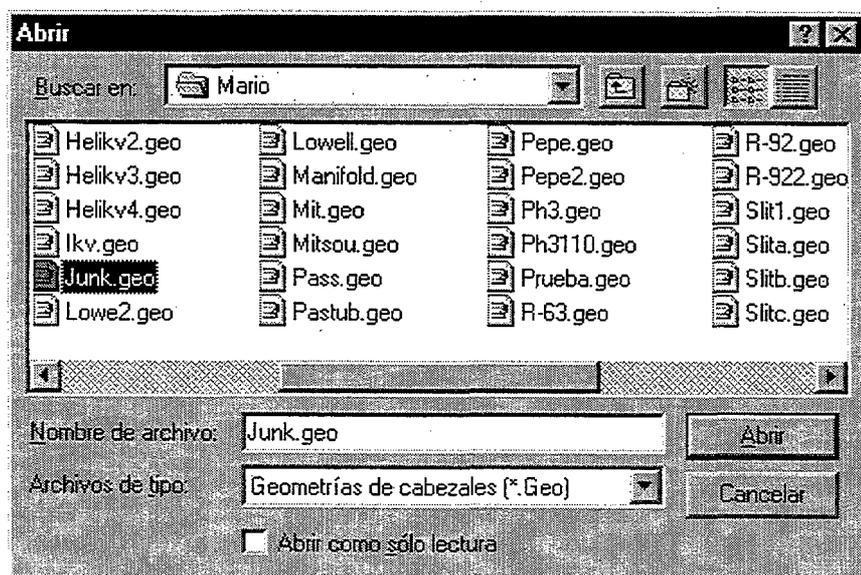


Fig. 13.4.- Gestión de ficheros de geometría

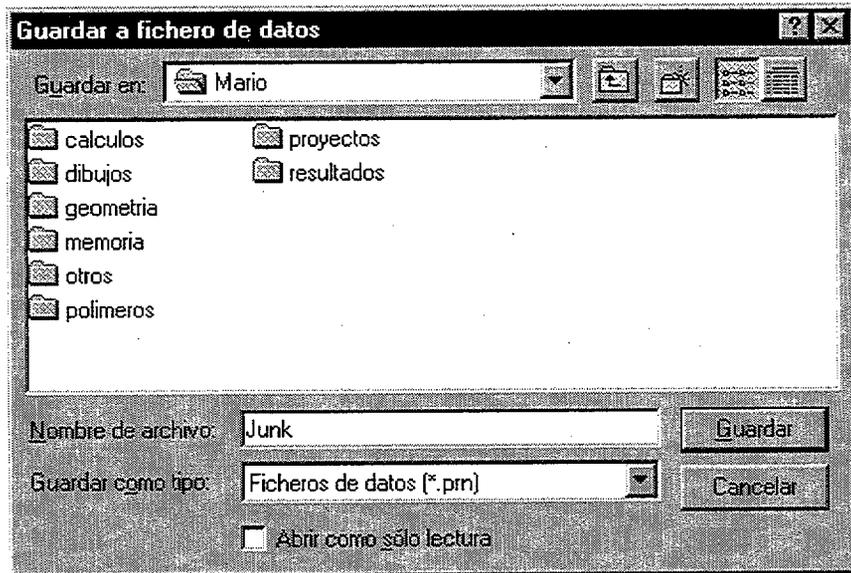


Fig.13.5.- Gestión de ficheros de resultados

* Definición de geometrías

Ésta es una de las partes fundamentales del programa ya que proporciona una herramienta muy eficaz para crear y modificar diferentes diseños de cabezales utilizando soportes de ayuda que agilizan enormemente la labor del diseñador. Se trata de definir el cabezal incluso con una rapidez mayor que utilizando sistemas CAD estandar del mercado.

Para mostrar las diferentes opciones que dá DIEPLAST empezaremos con la pantalla general, a continuación con definición del canal de flujo y posteriormente con la de los diferentes distribuidores. El acceso a la ventana de dibujo se dá desde la pantalla de *análisis*

La pantalla general de diseño gráfico presenta un área de dibujo , un área de menús, un área de información y dos áreas de comandos. El área de comandos varía en función de si se trata de geometrías con simetría de *revolución* o si se trata de geometrías tipo *ranura* rectangulares. En la Fig. 13.6 y 13.7 vemos con más detalle estas áreas mencionadas.

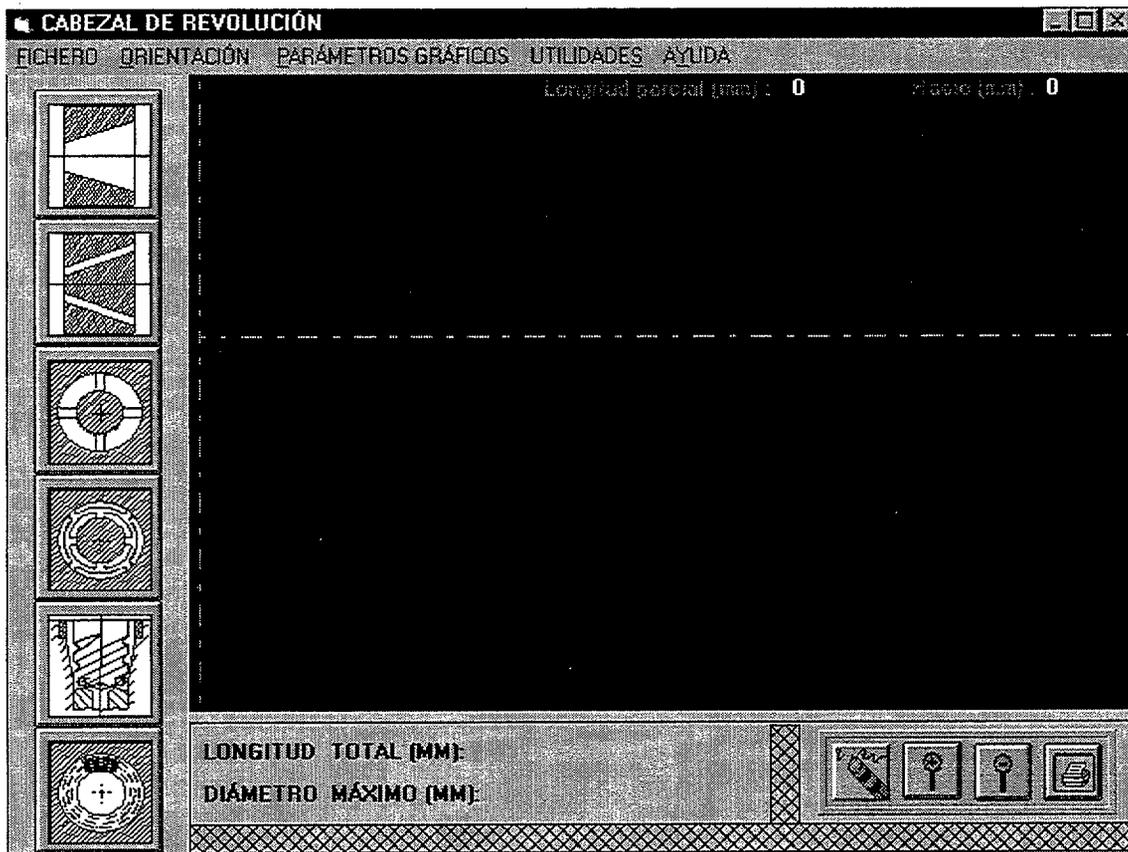


Fig.13.6.- Pantalla de diseño gráfico de cabezales con geometría de revolución.

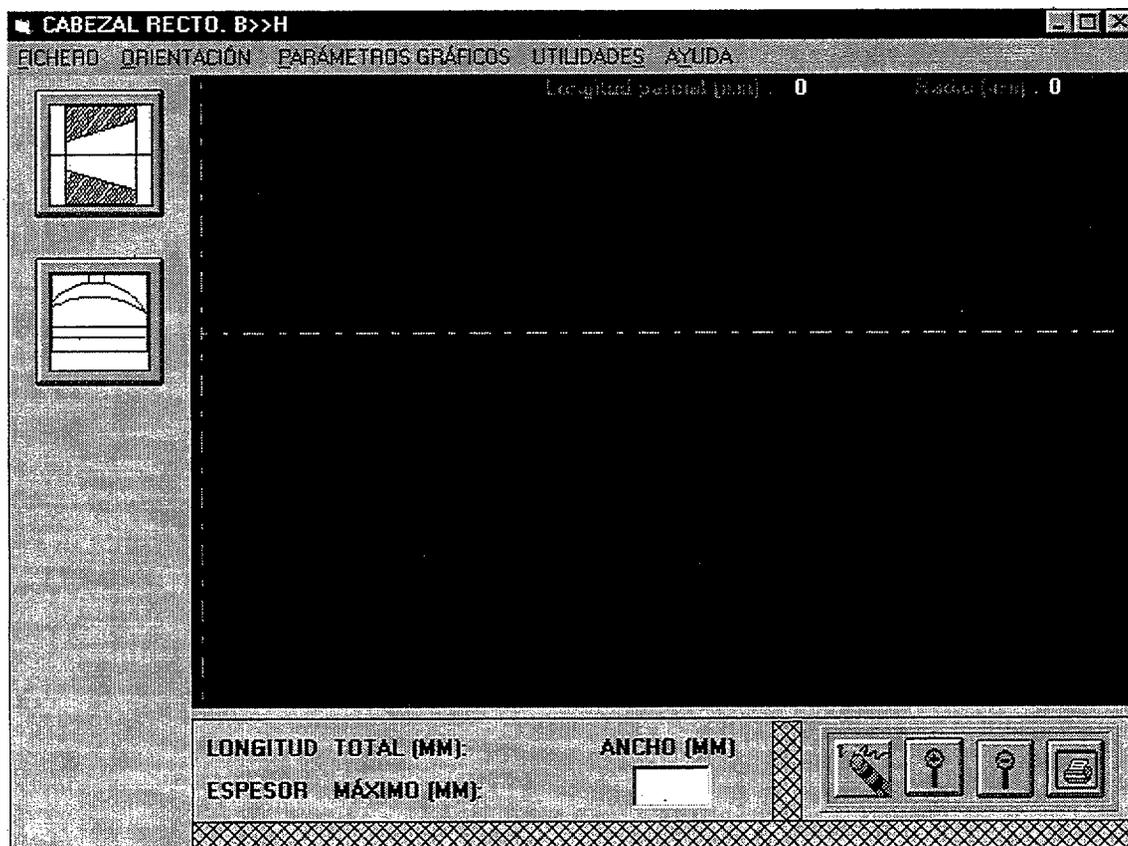


Fig.13.7.- Pantalla de diseño gráfico de cabezales con geometría tipo ranura rectangular.

En el área de *menús y submenús* tenemos las siguientes posibilidades:

- Ficheros. Permite la gestión de ficheros de dibujos, recuperar geometría, guardar, guardar como, borrar y la importación de ficheros en formato DXF.
- Orientación. Da paso a la ventana de orientación para el establecimiento de la geometría de los cabezales.
- Parámetros gráficos. Para ajustar la escala del dibujo, colores de entorno de dibujo, de línea, tipo de línea, etc.
- Utilidades. Por ejemplo calculadora para poder efectuar operaciones sencillas durante el proceso.

En el *área de comandos* de la izquierda y de arriba hacia abajo para geometrías de revolución (Fig.13.6):

- Comando de definición de tramo de canal de flujo del tipo lleno.
- Comando de definición de tramo de canal de flujo del tipo anular.
- Comando de diseño del difusor o soporte tipo “araña”.
- Comando de diseño del difusor o soporte de dos hileras de brazos.
- Comando de diseño del distribuidor del tipo “espiral”.
- Comando de diseño del difusor o soporte con agujeros.

En el caso de geometrías tipo ranura (Fig.13.7) para el área de comandos de la izquierda:

- Comando de definición de canal.

- Comando de definición de distribuidor curvo.

Todos estos comandos dan lugar a una subarea con campos de introducción de datos y gráficos de apoyo.

Los comandos de la parte inferior y de izquierda a derecha indican lo siguiente:

- Borrar dibujo. Borra el área de dibujo.
- Zoom más. Aumenta el tamaño del dibujo.
- Zoom menos. Disminuye el tamaño del dibujo.
- Imprimir. Imprime el dibujo en la impresora seleccionada con el gestor de impresoras de Windows.

El resto de la información que aparece en pantalla hace referencia a radios, longitudes, diámetros máximos, longitudes máximas, etc, que indiquen en cada momento la magnitud del trabajo que se vá desarrollando.

Definición de canales de flujo

Tanto en geometrías de revolución como en geometrías tipo ranura la forma de crear, modificar, borrar, etc los tramos del canal es similar, por lo tanto nos referiremos a las dos en su conjunto.

Al seleccionar los comandos de canal se abre una franja sobre la parte inferior de la pantalla donde se piden una serie de datos que debemos introducir. Estos datos se han planteado para que el usuario avance paso a paso hasta que completa en un corto espacio de tiempo todo el canal, introduciendo tan solo la información justa y necesaria. A

medida que se van añadiendo datos y se van aceptando al mismo tiempo aparece en el área de dibujo lo realizado hasta ese momento. También podemos insertar tramos entre dos ya definidos. Los datos solicitados corresponden al tipo de geometría con el que se trabaje en ese caso. Excepto en el primer tramo tan solo hemos de establecer el punto final y longitud ya que el punto de inicio viene definido del paso anterior.

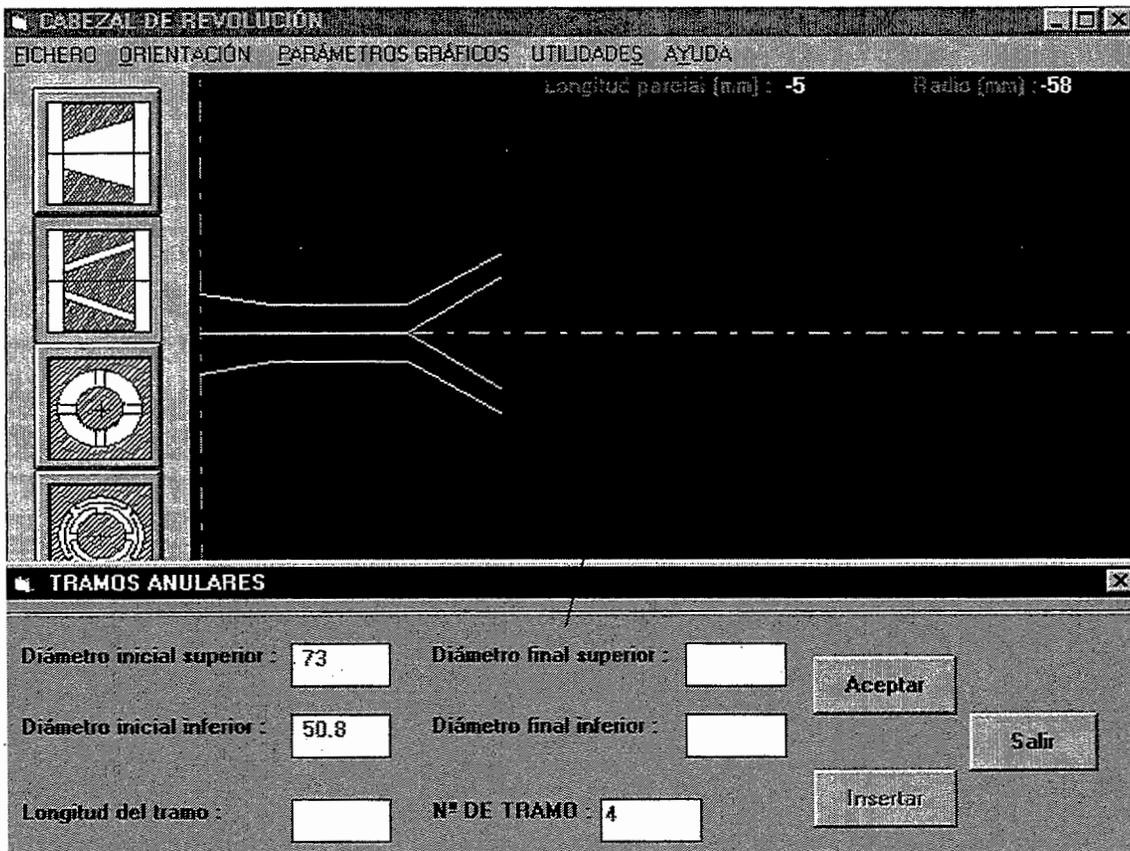


Fig.13.8.- Adición e inserción de tramos del canal de flujo.

Definición de soportes y distribuidores

En el proceso de adición de tramos llegará un momento en el que es necesario introducir bien un soporte o bien un distribuidor. Para ello como hemos comentado al accionar los comandos de la izquierda seleccionaremos el deseado. No obstante el programa solo permite esta opción si se cumplen una serie de requisitos:

- Que no exista ya otro distribuidor o soporte (como norma general).
- Que el tipo de canal corresponda con la tipología elegida.
- Que el distribuidor se situe en la posición adecuada si viene condicionado de esa manera (por ejemplo los espirales solo pueden ir a la entrada del cabezal).

El dimensionamiento de los mismos se realiza mediante ventanas con entrada de datos numéricos y un apoyo gráfico para indicar a que corresponde cada parámetro.

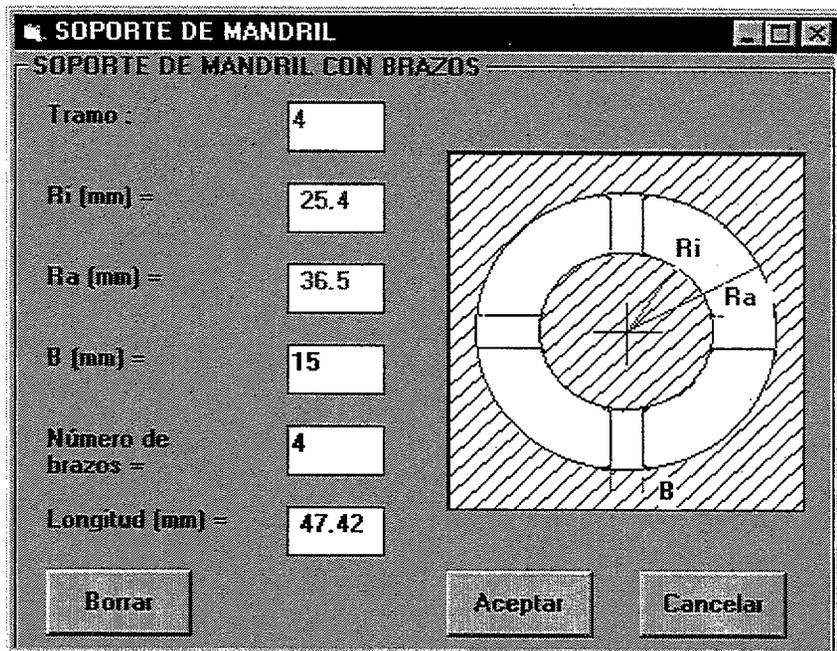


Fig. 13.9.- Pantalla de soporte tipo “araña”

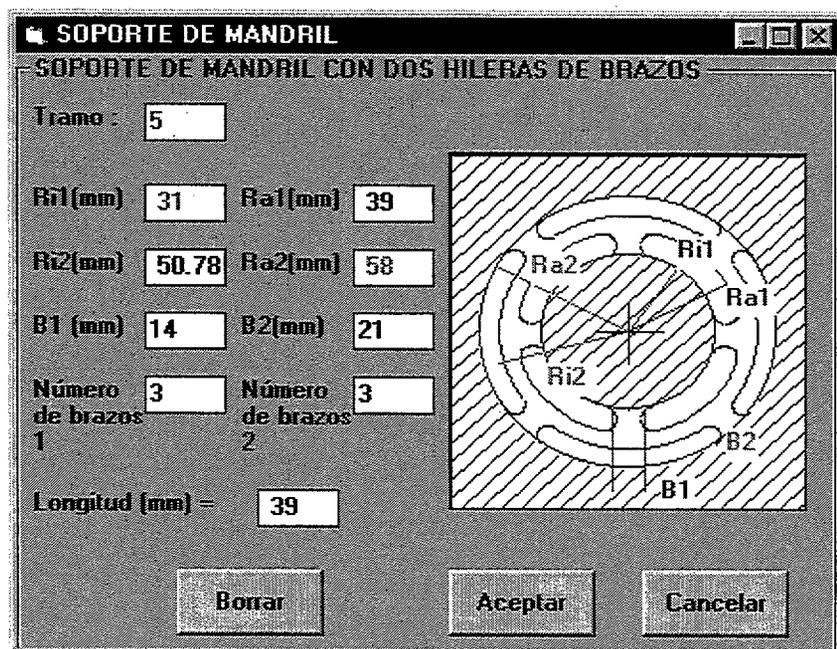


Fig. 13.10.- Pantalla de soporte de dos hileras de brazos

En las figuras 13.9 y 13.10 podemos ver como dimensionamos dos soportes o distribuidores muy utilizados en la práctica, sobre todo el primero. Basándonos en el esquema vamos introduciendo los datos solicitados; una vez completados aceptamos y automáticamente se actualizará el gráfico mostrado en la zona de dibujo.

Los distribuidores al ser más complejos tienen una forma de dimensionamiento algo diferente que los soportes; empezaremos por el espiral o helicoidal.

El distribuidor helicoidal, tal como aparece en la figura 13.11, requiere de más parámetros. No todas las combinaciones de valores numéricos son posibles ya que nos pueden llevar a soluciones absurdas. Es por ello que al aceptar los valores introducidos se le indica al diseñador una información adicional para que éste verifique la idoneidad o nó del camino elegido. La información consiste además de calcular el número de ranuras resultante en calcular el espesor de las alas. si el espesor es muy pequeño desde el punto de vista resistente o constructivo lógicamente deberíamos de cambiar la geometría. Igualmente el programa realiza pequeños ajustes en la geometría para darle una mayor coherencia.

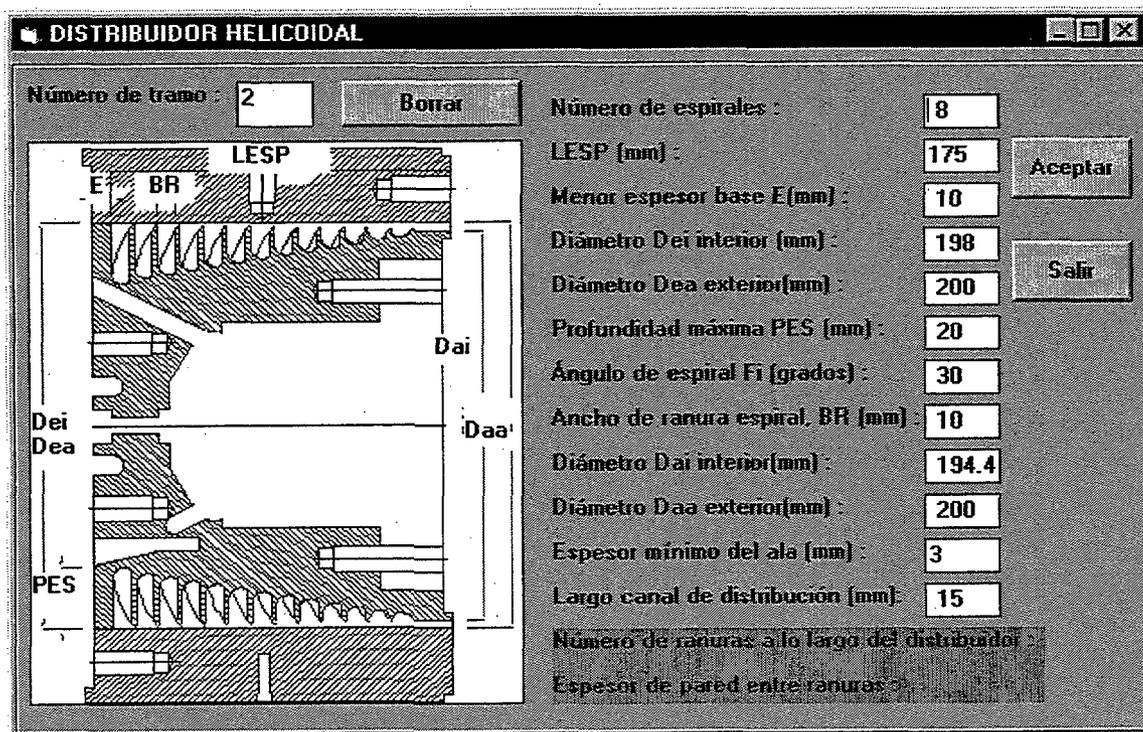


Fig. 13.11.- Pantalla de distribuidor espiral o helicoidal.

El caso del distribuidor utilizado en cabezales con geometrías tipo ranura es diferente. Ello se debe a que su diseño no es definido completamente por el usuario al menos de entrada sino que solo se darán algunas dimensiones básicas para que luego el programa en función de parámetros introducidos en forma de restricciones (por ejemplo la presión) calcule el resto de los elementos que faltan (ver memoria en su apartado correspondiente a métodos de cálculo).

En la figura 13.12 podemos observar como se trata de el único caso en todos los implementados en DIEPLAST donde la definición geométrica no es completamente libre sino que viene en parte condicionada por algunos parámetros de trabajo (e incluso el material utilizado). Así por ejemplo vemos en la pantalla como aparecen valores de T^a , de presión, producción y por supuesto debemos tener previamente seleccionado un material de la base de datos. Se dan dos opciones según demos como entrada el valor de Y_0 o el de una caída de presión deseada. Al seleccionar el comando “dibujar” en la parte derecha de la pantalla se representa este distribuidor y sobre la marcha podemos decidir si constructivamente es viable o no. Terminado el proceso pasaría a formar parte del conjunto del cabezal en la pantalla general.

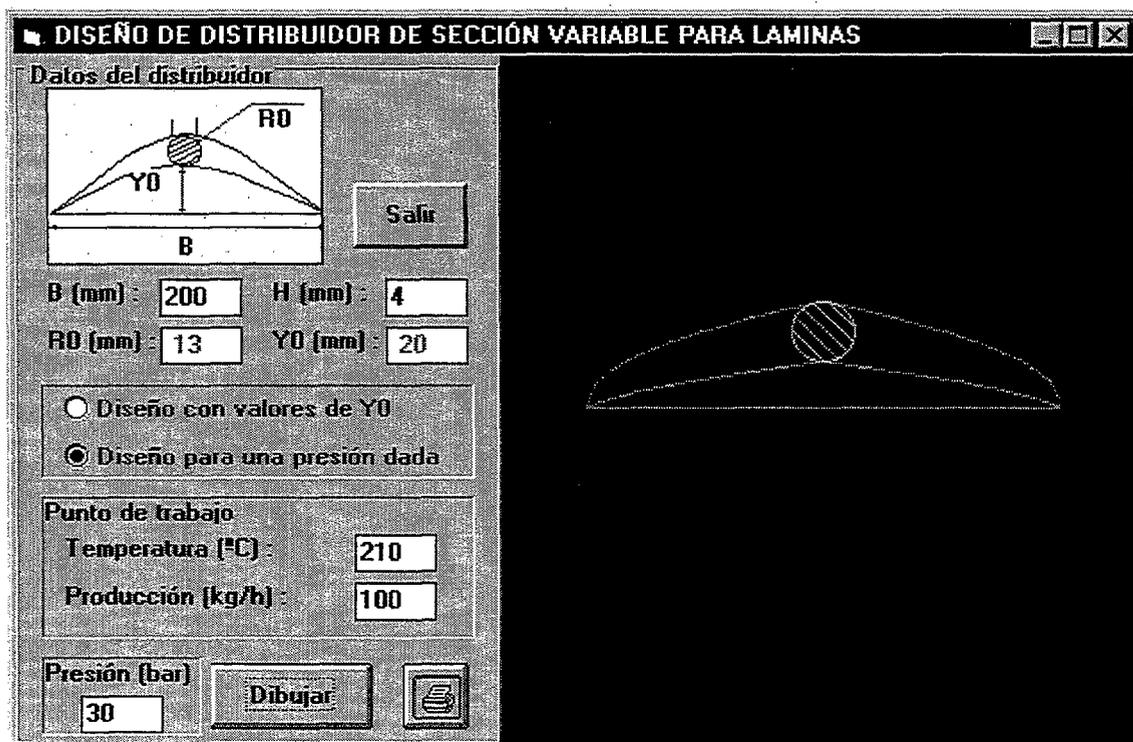


Fig. 13.12.- Pantalla de distribuidor para geometrías tipo ranura.

Modificaciones de la geometría

Es algo evidente que durante el proceso no solamente de diseño gráfico sino también de análisis del cabezal hemos de proporcionar una herramienta muy flexible e interactiva para que las modificaciones o cambios del mismo no resulten engorrosos y lentos. El mecanismo elaborado es el siguiente, siempre pensando en el posible usuario de formación no muy alta; vemos en la figura 13.3 como en el área de dibujo al ir creando tanto los tramos como el distribuidor o el soporte van apareciendo en la parte inferior del gráfico una serie de comandos numerados. Estos comandos no solamente nos indican el número de tramo sino que además nos sirven como puerta de acceso a una ventana de modificaciones de dicho tramo, soporte o distribuidor. Es una forma fácil y sencilla que tiene el usuario de acceder en cualquier momento por un lado a información general del tramo (de que tipo es, que tipo de distribuidor, etc) y por otro de modificar el mismo.

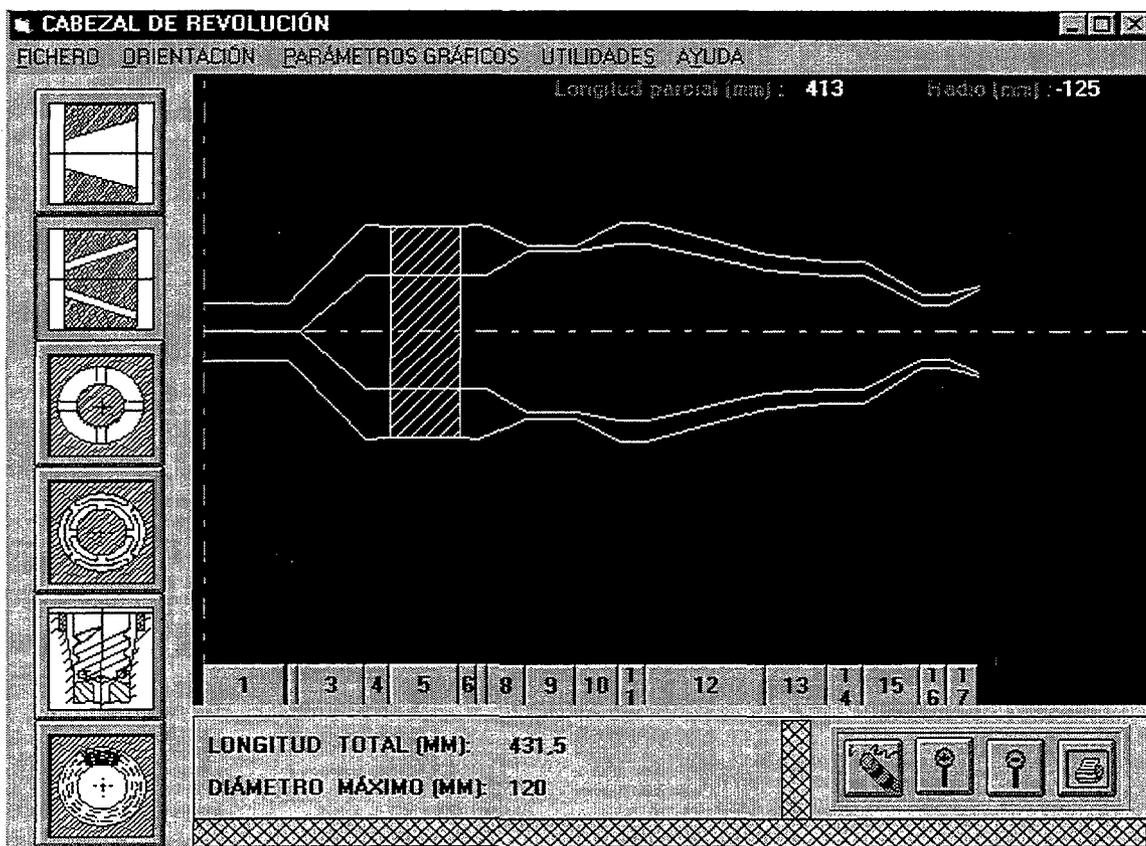


Fig. 13.3.- Área con comandos de modificación de tramo.

Al accionar los comandos de modificación tenemos posibilidades, que se trate de un tramo de canal o que se trate de un tramo de distribuidor o soporte. En el segundo caso aparecerían ventanas similares a las ya expuestas anteriormente, en el primer caso en la parte inferior del área de diseño se activaría una nueva pantalla similar a la utilizada para añadir tramos pero con algunas diferencias (Fig. 13.4).

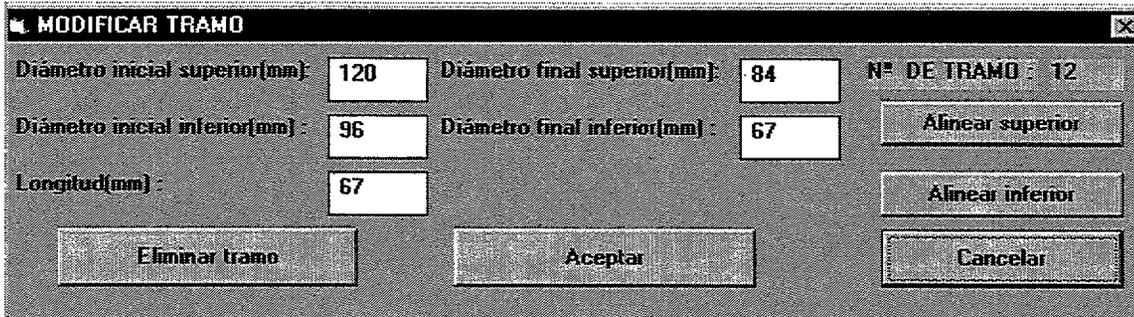


Fig. 13.4.- Pantalla de modificación de tramo ya creado previamente.

Las diferencias son:

- 1.- Se pueden cambiar tanto el campo del punto final como el inicial.
- 2.- Se puede eliminar el tramo.
- 3.- Se permiten efectuar operaciones de alineamiento con los tramos contiguos tanto de las líneas de pared del canal superior como de pared inferior. Esta opción merece especial atención ya que proporciona un gran utilidad al diseñador para afrontar casos reales .

Las opciones de alineamiento superior e inferior permiten el ajuste final de un tramo donde por necesidades constructivas una de las paredes del canal debe estar alineada con las del tramo contiguo. Esta circunstancia, que explicaremos con un pequeño ejemplo ,se da muy frecuentemente en la práctica, donde como sabemos el cabezal está formado por multiples piezas que se montan entre sí definiendo lo que va a ser el canal de flujo. Puede ocurrir por tanto que mientras en la pieza exterior tengamos

una pared lisa en la pieza interior correspondiente tengamos un quiebro. En este caso cuando definamos el canal tramo a tramo el diseñador tendría una dificultad ya que tendría que cortar la pieza exterior en dos partes (cada parte sería un tramo, condicionada por la pieza interior) y le obligaría a tener que calcular el diámetro de dicho corte. Estos cálculos lo único que conseguirían sería retrasar y ralentizar el proceso de diseño, haciéndolo más engorroso. Con la utilidad introducida en DIEPLAST el diseñador inicialmente puede definir exteriormente en el punto intermedio de dos tramos un diámetro cualquiera y al indicar *alineamiento superior* automáticamente las dos líneas quebradas se transformarían en una sola.

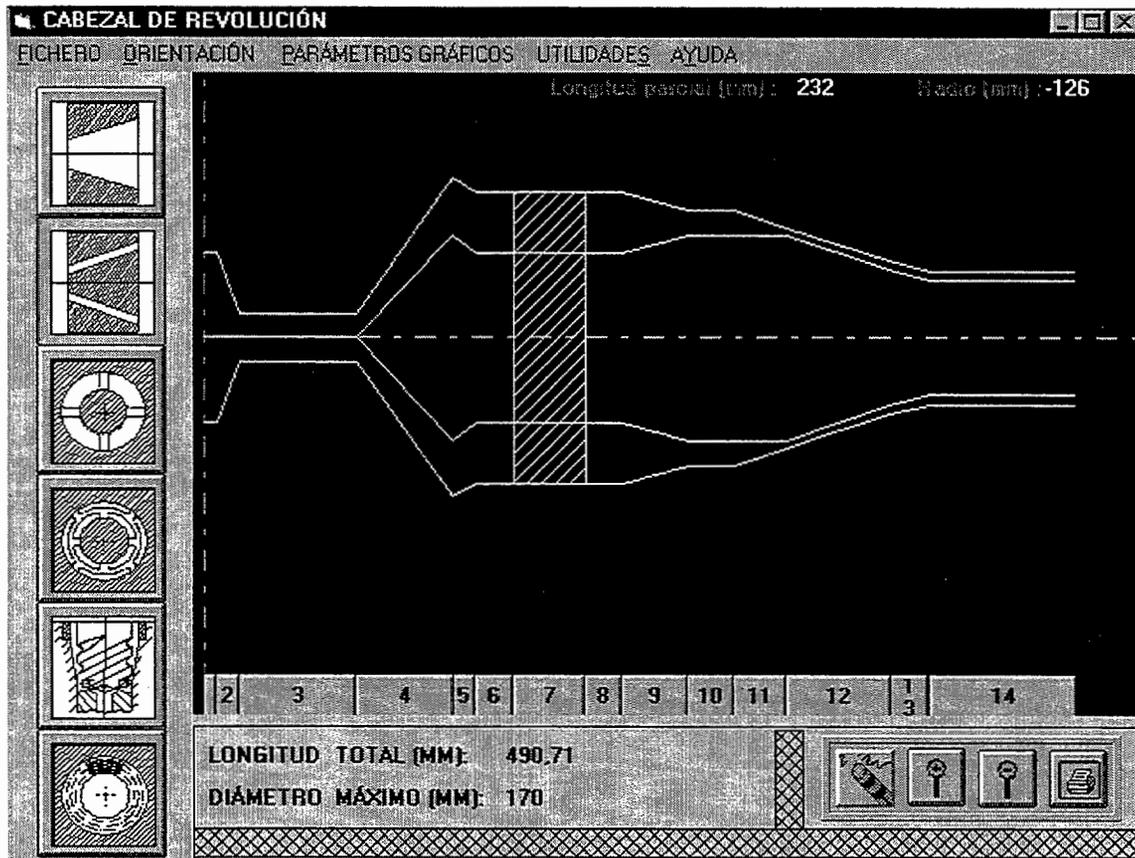


Fig. 13.5.- Tramos 4 y 5 sin alineamiento superior.

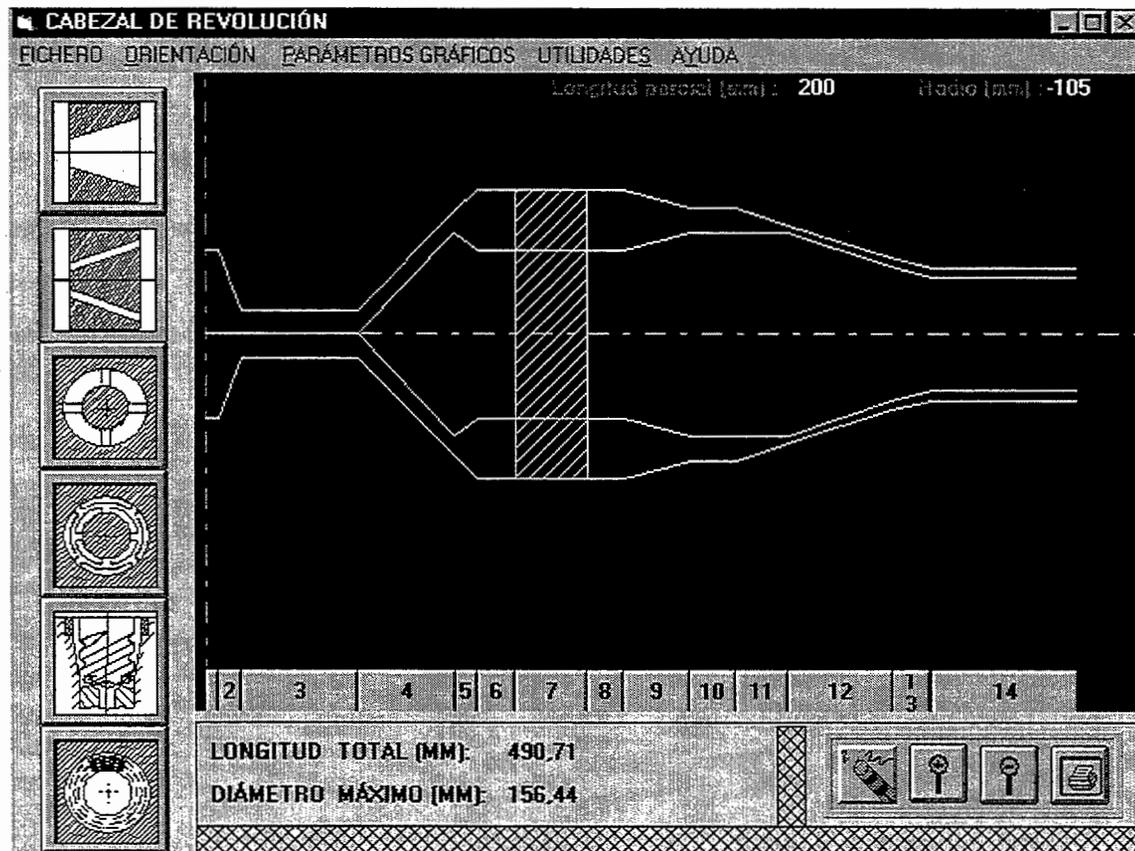


Fig.13.16.- Tramos 4 y 5 con alineamiento superior.

En las figuras 13.15 y 13.16 hemos visto como se rompe el quiebro existente en la línea superior entre los tramos 4 y 5 convirtiendola en una sola línea, en cambio se mantiene el quiebro de la línea inferior. Si la operación se realizace con la línea inferior el proceso es exactamente igual.

Una vez concluidas todas las modificaciones el programa procede a un reajuste total para adecuarse a la nueva geometría.

Orientación del diseño del cabezal

Para converger antes a la solución más adecuada se ha pensado que resultaría muy útil que ya desde la fase de concepción geométrica se orientase al usuario de una manera más o menos automatizada a la hora de modelizar el cabezal. El criterio seguido para esta orientación es basarnos fundamentalmente en la experiencia de muchos años tanto de fabricantes como de expertos y estudiosos del tema. Sería absurdo no aprovechar toda esta experiencia y partir de cero. Ésto no significa en ningún caso que luego tengamos que seguir estrictamente estas orientaciones puesto que en función de los resultados obtenidos en ese caso concreto el diseñador tendrá que decidir que camino seguir. No obstante, sobre todo en los principiantes y tal vez en los no tan principiantes, siempre es de agradecer una ayuda suplementaria que nos guie en la ruta mas óptima.

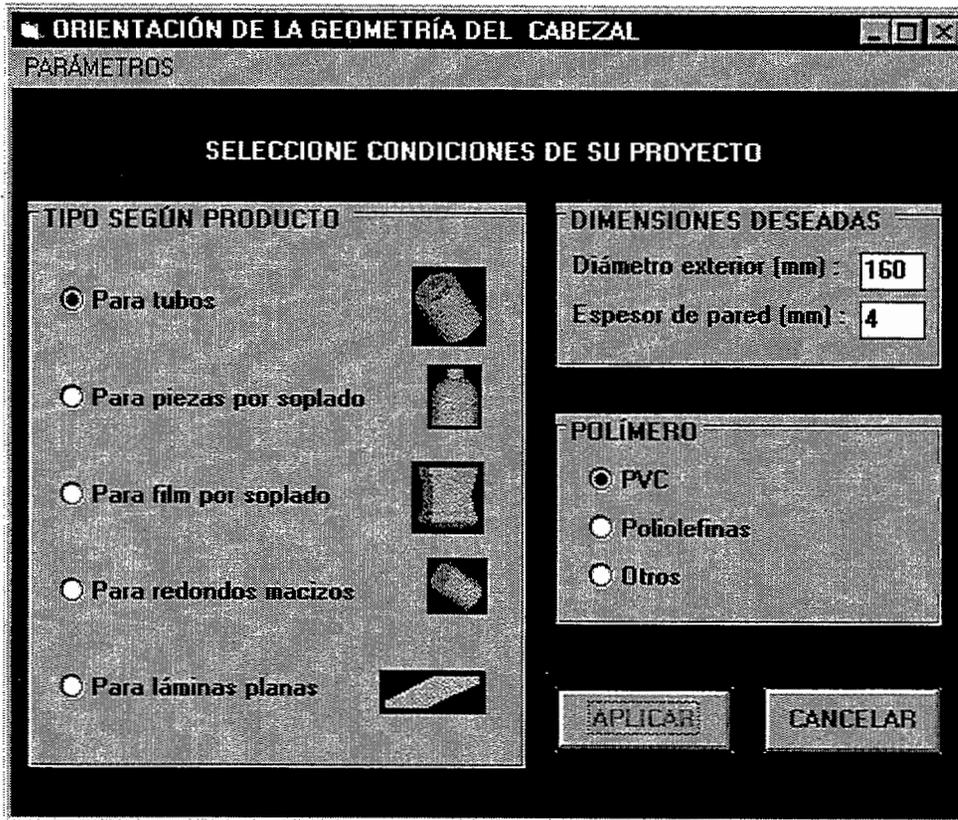


Fig.13.17.- Pantalla de orientación de la geometría.

La pantalla se ha estructurado de tal manera que el usuario seleccione el tipo de producto a fabricar. Una vez seleccionado se solicitan aquellos parámetros característicos que definen al producto (dimensiones, material). Con la idea de ser generalistas y dado que no se disponen de orientaciones en todos los casos posibles solamente aparecerán en pantalla los parámetros implementados.

Una vez elegido lo que se quiere al pulsar el comando aceptar de una manera automática se actualiza todo el cabezal que había sido prediseñado. Este último punto es importante recalcarlo ya que siempre es necesario elaborar un prediseño antes de activar la orientación.

A continuación mostramos de manera resumida algunas de las expresiones aplicadas en el caso de fabricación de tubos y que han sido sacadas de la bibliografía disponible [15,18,21,35]. Las expresiones expuestas han sido trabajadas según criterio propio basándonos en diversas posibilidades planteadas por los autores que no siempre

siguen exactamente el mismo criterio, sin embargo el resultado de las mismas se puede dar como aceptable. Sin duda el apartado de orientación es susceptible de ampliación en función de la información recabada.

Orientación en el caso de tubos de PVC

D= Diámetro exterior del tubo q= Factor de hinchamiento estimado (%)

s= Espesor del tubo

* Diámetro exterior de salida del cabezal

$$D_2 = D \tag{13.1}$$

* Diámetro interior de salida

$$D_1 = \sqrt{D_2^2 - [D^2 - (D - 2 \times S)^2]} \times \left[\frac{100}{100 + q} \right] \tag{13.2}$$

El valor de q oscila entre un 10 y un 35%

* Longitud de la zona de relajación

$$L = 20 \times \frac{(D_2 - D_1)}{2} \tag{13.3}$$

* Diámetro exterior del soporte tipo araña

$$D_{2s} = R_1 \times D_2 + F_c \times \left[\frac{D_2^2 - D_1^2}{4 \times R_1 \times D_2} \right] \tag{13.4}$$

$$R_1 = 1.4 \div 1.6$$

$$F_c = 5 \div 7$$

F_c = Factor de compresión

* Diámetro interior del soporte tipo araña

$$D_{1s} = R_1 \times D_2 - F_c \times \left[\frac{D_2^2 - D_1^2}{4 \times R_1 \times D_2} \right] \quad (13.5)$$

* Largo del soporte tipo araña

$$L_s = 0.5 \times \frac{(D_{2s} + D_{1s})}{2} \quad (\text{siempre menor a } 75) \quad (13.6)$$

* Ancho de brazo de soporte tipo araña

$$B = 9 \div 12 \quad (13.7)$$

Orientación en el caso de tubos de poliolefinas

* Diámetro exterior de salida del cabezal

$$D_2 = D \times 1.05 \quad (13.8)$$

* Diámetro interior del cabezal

$$D_1 = D_2 - 2 \times s \quad (13.9)$$

* Longitud de relajación

Con torpedo

$$L = 20 \times \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (13.10)$$

$$\text{Con distribuidor helicoidal} \quad L = 12 \times \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (13.11)$$

* Diámetro exterior soporte tipo araña

$$D_{2s} = R_2 \times D_2 + F_c \times \left[\frac{D_2^2 - D_1^2}{4 \times R_2 \times D_2} \right] \quad (13.12)$$

$$R_2 = 2. (1.3D \gg)$$

$$F_c = 5 \div 7$$

F_c = Factor de compresión

* Diámetro interior del soporte tipo araña

$$D_{1s} = R_2 \times D_2 - F_c \times \left[\frac{D_2^2 - D_1^2}{4 \times R_2 \times D_2} \right] \quad (13.13)$$

* Largo del soporte tipo araña

$$L_s = 0.5 \times \frac{(D_{2s} + D_{1s})}{2} \quad (\text{siempre menor a } 75) \quad (13.14)$$

* Ancho de brazo de soporte tipo araña

$$B = 9 \div 12 \quad (13.15)$$

Otras consideraciones que se pueden tener en cuenta

En el caso de cabezales para soplado utilizando HDPE se suele tomar la relación entre el diámetro de salida exterior del cabezal y el diámetro medio del soporte con un valor que oscila entre 0.8 y 1.

En general un criterio es que el área de salida sea entre un 10 y un 15% menor al área del tubo pensando en el hinchamiento, enfriamiento y calibración.

Definición automática de mallados

Cuando seleccionamos en la pantalla de análisis “método numérico” como forma de cálculo se hace necesario definir previamente un mallado en todo el cabezal. Sobre los nodos de esta malla se calcularán todos los parámetros necesarios para la toma de decisiones.

La pantalla de definición de malla se abre desde la pantalla de análisis y nos sirve para su creación y visualización. Tiene dos zonas, la superior de representación gráfica del cabezal y su mallado y la inferior donde entre otras opciones podemos elegir el sistema de generación que queremos.

Primer sistema. Manual

Con este método tenemos que indicar el número de capas y el ancho del elemento. La generación se efectúa siguiendo los criterios vistos en 9.6. Una vez introducidos estos dos valores se crea un mallado constante que es dibujado en pantalla instantáneamente. Hay que aclarar que el concepto de “manual” viene al ser introducidos los dos valores por parte del usuario sin ningún tipo de restricción, pero que lógicamente existe una cierta automatización ya que el programa calcula la posición de todos los nodos automáticamente.

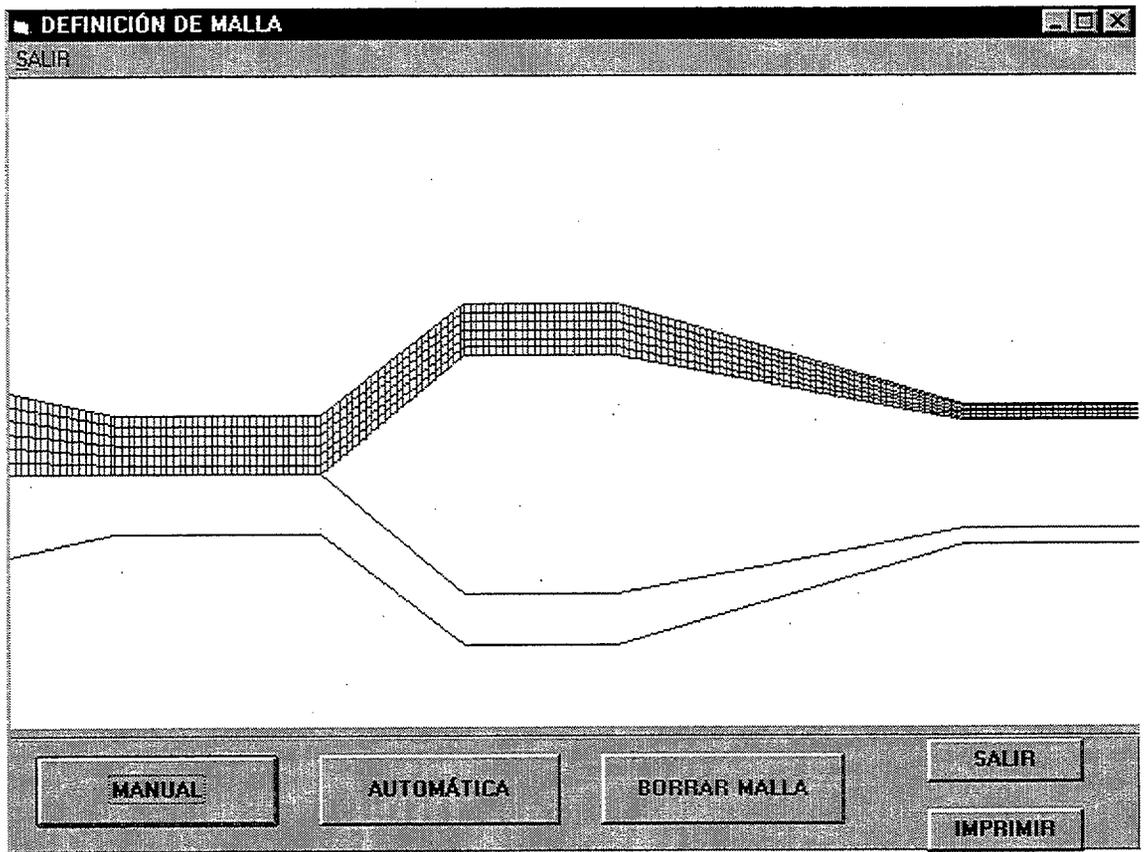


Fig.13.18.- Generación de mallado uniforme sin garantía de convergencia.

Segundo sistema. Automático.

La diferencia con el sistema anterior es que el usuario solo debe introducir un valor, el número de capas, calculándose el ancho de los elementos por parte del programa y siguiendo los criterios de convergencia de la solución establecidos en 9.6. Este sistema nos dá un mallado no uniforme a lo largo del cabezal (Fig.13.19).

Resumiendo con ambos sistemas generamos mallas de una forma muy rápida y práctica, teniendo el primero sobre el segundo la ventaja de una mayor flexibilidad de definición y el segundo sobre el primero la ventaja de una mayor garantía de convergencia de la solución.

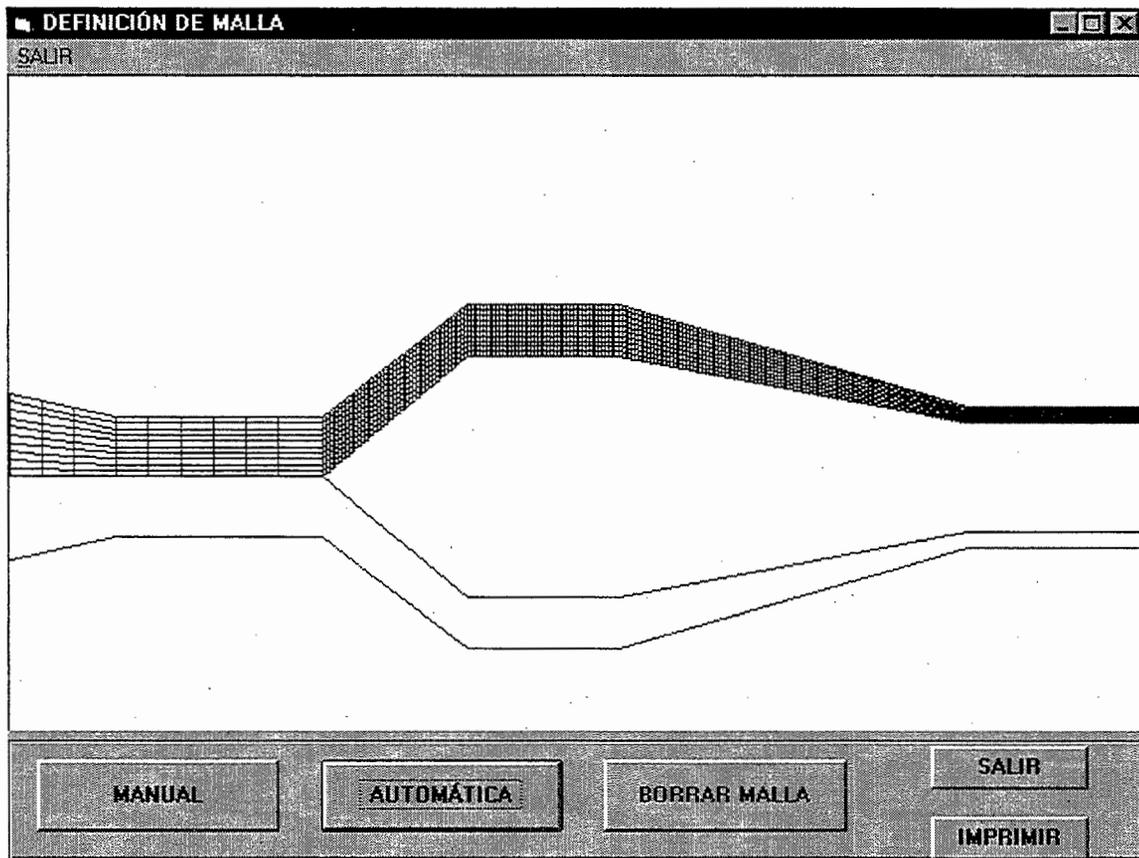


Fig.13.19.- Generación de mallado no uniforme con garantía de convergencia.

Análisis de resultados

Una vez que se ha procedido a la introducción de los diferentes datos para que se puedan efectuar los cálculos se hace necesario un análisis de resultados para poder decidir. La pantalla central desde donde se puede acceder a todos ellos, activando otras pantallas es la de “análisis” (Fig.13.20). Es realmente el centro de actividad de DIEPLAST pues es el nexo de unión por el que hay que pasar para acceder a una gran parte de las opciones.

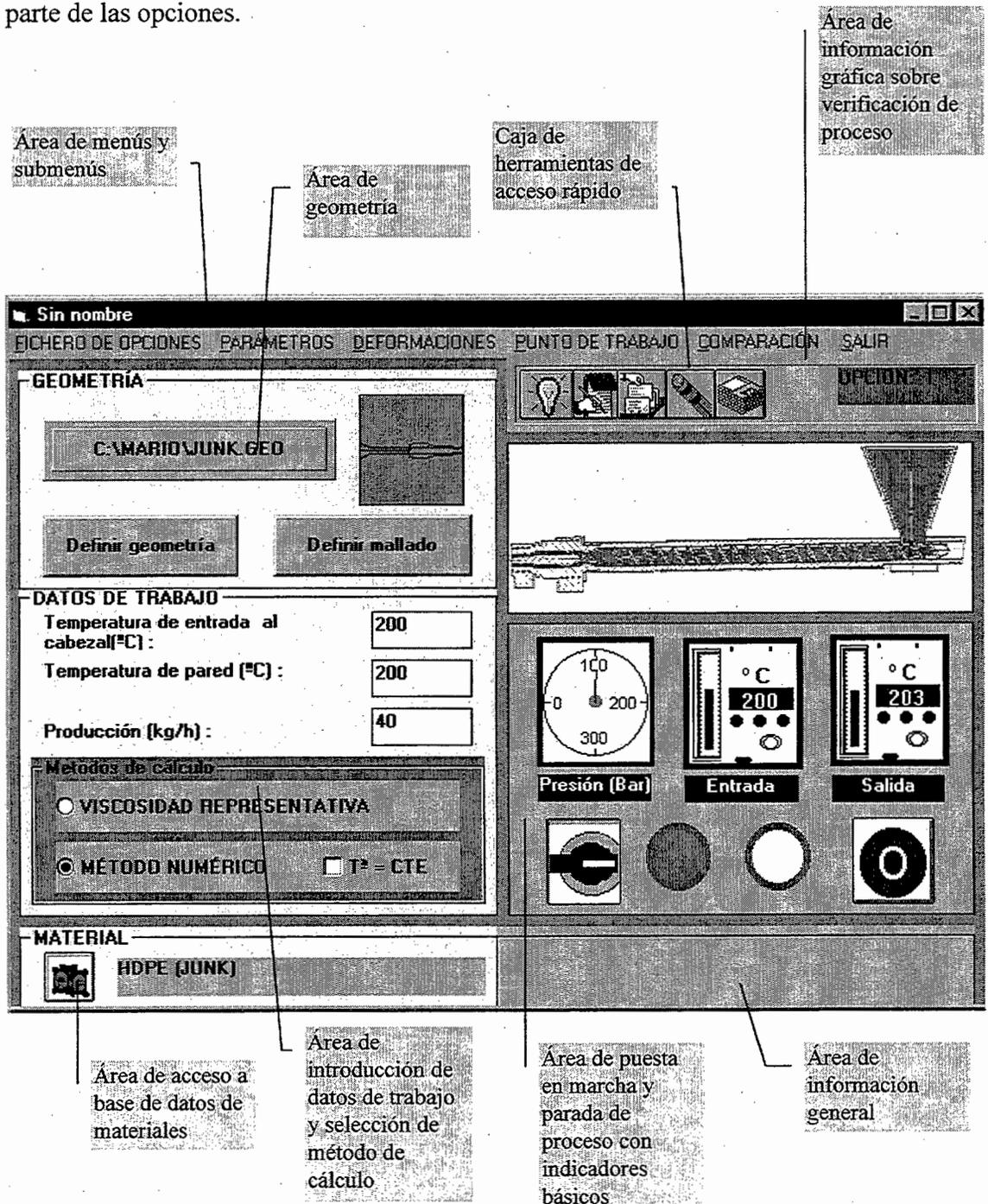


Fig.13.20.- Pantalla de análisis.

Si dividimos la pantalla en diferentes áreas tenemos las siguientes principales:

- 1.- Área de menús y submenús.
- 2.- Caja de herramientas de acceso rápido.
- 3.- Área de geometría.
- 4.- Área de puesta en marcha y parada del proceso e indicadores básicos.
- 5.- Área de introducción de datos de trabajo y selección de método de cálculo.
- 6.- Área de acceso a base de datos y selección de material.
- 7.- Área de información general.
- 8.- Área de información gráfica sobre verificación de proceso.

1.- Área de menús y submenús

Es un área de mucho uso ya que nos permite navegar por una gran cantidad de opciones en el programa.

* *Fichero de opciones.* Es un gestor de ficheros de opciones (estructura que explicaremos en el punto 14) donde realizamos todas las operaciones típicas, nuevo, guardar, borrar, etc. También nos permite guardar en fichero todos los resultados (nodo por nodo) si así lo deseamos por ejemplo para una lectura en un programa externo de tratamiento de datos. La estructura es:

Fichero de opciones

Nueva opción

Guardar

Recuperar opción

Borrar opción

Guardar resultados a fichero

* *Parámetros.* Nos da la ventana de acceso para poder analizar los parámetros resultantes del estudio desde diferentes puntos de vista. Cada submenú nos da paso a resultados en forma de curvas, de tablas, por tramos, gráficos de campo, etc. Es por tanto un punto de paso obligado durante el estudio de un cabezal.

Parámetros

Velocidades medias

Velocidades de cizalla

Tensiones

Caída de presión

Temperaturas

Viscosidades

Distribuidor helicoidal

Caudales

Flujo perdido en espiral

Flujo perdido en la ranura

Caudal a la salida

Caída de presión

Velocidades medias

Velocidad de cizalla

Tensiones en pared

* *Deformaciones.* Es el punto de entrada para estudiar todo el proceso referente a la deformación del extrusado, relajación, factores de hinchamiento, etc.

Deformaciones

Ensanchamiento del extrusado

Modelo de Wortberg y Junk

Modelo de Tanner

Deformaciones reversibles

Longitudinales

Circunferenciales

Curva de producción-ensanchamiento

* *Punto de trabajo*. Nos introduce en una zona donde podemos establecer además de la curva característica del cabezal un área de trabajo posible según restricciones impuestas (a comentar más adelante).

Punto de trabajo

Curva característica simple

Área de trabajo

* *Comparación*. Tabla de resumen de resultados y que también comentaremos más adelante

2.- Caja de herramientas de acceso rápido.

Es una botonera de comandos que realizan la misma función que los contenidos del menú ficheros.

3.- Área de geometría.

Tiene los comandos siguientes:

- * Entrada a definición de geometrías (nos pregunta que tipo, si circular o tipo slit).
- * Entrada a definición de mallado (solo si hemos seleccionado método numérico).
- * Comando de gestión de ficheros de dibujo para su apertura con rótulo indicativo del que tenemos activo en este momento.
- * Icono gráfico para visualizar el dibujo del cabezal que hemos seleccionado.

En definitiva además de darnos paso a otras pantallas de definición gráfica nos facilita la gestión de ficheros de dibujo sin salir de la pantalla de análisis.

4.- Área de puesta en marcha y parada de proceso.

Simula los que sería el panel de mandos de una extrusora simple buscando la sencillez y rápido entendimiento del programa.

- * Interruptor de puesta en marcha. Inicia todos los cálculos según el método seleccionado. Cuando estos terminan se enciende el piloto verde.
- * Interruptor de parada. Interrumpe y aborta cualquier proceso de cálculo iniciado. Se enciende el piloto rojo.
- * Indicador de presión. Presión total resultante del cálculo.
- * Lector de temperatura de entrada (de masa) en °C.
- * Lector de temperatura de salida (valor medio) en °C.

5.- Área de introducción de datos de trabajo y selección de método de cálculo.

Los datos se refieren a un punto concreto de trabajo, siendo éstos la temperatura de pared (°C) del cabezal, la temperatura de entrada de masa (°C) y la producción (kg/h). El método de cálculo seleccionado (viscosidades representativas, numérico) lo elegimos simplemente marcando la opción deseada. Para el método numérico se puede además hacer que los cálculos se realicen en condiciones isotérmicas o no. Para viscosidades representativas no se da esta opción ya que siempre es isotérmico.

6.- Área de acceso a base de datos y selección de material.

Para agilizar al máximo el proceso de diseño se ha dado una puerta directa a la base de datos de materiales para seleccionar el adecuado. Al lado del comando se indica que polímero está activo en este momento.

7.- Área de información general.

Información acerca de comandos, zonas de trabajo, etc

8.- Área de información gráfica sobre verificación de proceso.

Es muy frecuente que en el proceso de diseño se nos olvide por ejemplo seleccionar el material, o la geometría, etc. Para ello se han establecido unos iconos que representan esquemáticamente una extrusora y sus diferentes partes. Así por ejemplo si se nos olvida el material la tolva de la extrusora empieza a parpadear como señal de alarma; si no hemos definido la geometría es el propio cabezal el que parpadea, etc. Todo esto ocurre al poner en marcha la extrusora, donde el número de errores cometidos puede ser bastante grande, no solamente de haber completado todos los datos de entrada sino de tenerlos correctamente preparados (datos ilógicos, fuera de rango, etc). Es por eso que además de estos iconos gráficos de alarma se complementa el programa con mensajes de error indicando al usuario de donde viene la causa (no convergencia de la solución, parámetros de entrada erróneos, etc).

Antes de entrar con un mayor detenimiento a analizar los parámetros resultantes indicar que la pantalla de análisis se ha pensado para proporcionar al usuario un *centro de operaciones* desde donde controlar todo el programa y que evite su *pérdida* entre tanta maraña de menús, pantallas, opciones. En otras palabras dispone en *análisis* de información suficiente del trabajo que lleva realizado hasta el momento; así por ejemplo, se muestra ,entre otra ,información del fichero de geometría utilizado (si ha sido salvado previamente, no absolutamente necesario), de la opción , del material utilizado y del proyecto en estudio.

Ahora sí para una mayor comprensión de los parámetros resultantes del estudio vemos a continuación las diferentes maneras de presentarlos. Dedicamos un apartado especial a los relacionados con la deformación y a los distribuidores helicoidales por sus características particulares.

Diferentes formas de presentación de parámetros

Para poder interpretar los resultados sean del tipo que sean se han pensado diferentes maneras o procedimientos los más generales son los que se muestran a continuación:

- a) Valores tomados al final de cada tramo del cabezal expresados en forma de curva.
- b) Valores tomados al final de cada tramo del cabezal expresados en tabla de una dimensión.
- c) Valores en todos los nodos en forma de tabla de dos dimensiones.
- d) Valores en todos los nodos expresados en forma de gráfico de campo.
- e) Valores en los nodos del final de cada tramo expresados en forma de curvas.

a) Valores tomados al final de cada tramo del cabezal expresados en forma de curva (Fig. 13.21)

Tanto para método analítico como numérico nos interesa ver la evolución por ejemplo de la presión a lo largo de todo el cabezal y tramo por tramo. Ello nos ayuda averiguar por ejemplo cual es el tramo donde se produce una mayor caída y poder tomar decisiones al respecto modificando algunos parámetros.

b) Valores tomados al final de cada tramo del cabezal expresados en tabla de una dimensión (Fig.13.21)

Es similar al caso anterior solo que lo que se muestra es el valor del parámetro en dicho tramo. Si se trata de un parámetro como la presión nos dice la caída en Bar en ese tramo. Por el contrario si se trata de otros parámetros como velocidad media (mm/s),

velocidad de cizalla en la pared ($s-1$) o tensión de cortadura en la pared (bar) se refieren a los valores que toman al final del tramo.

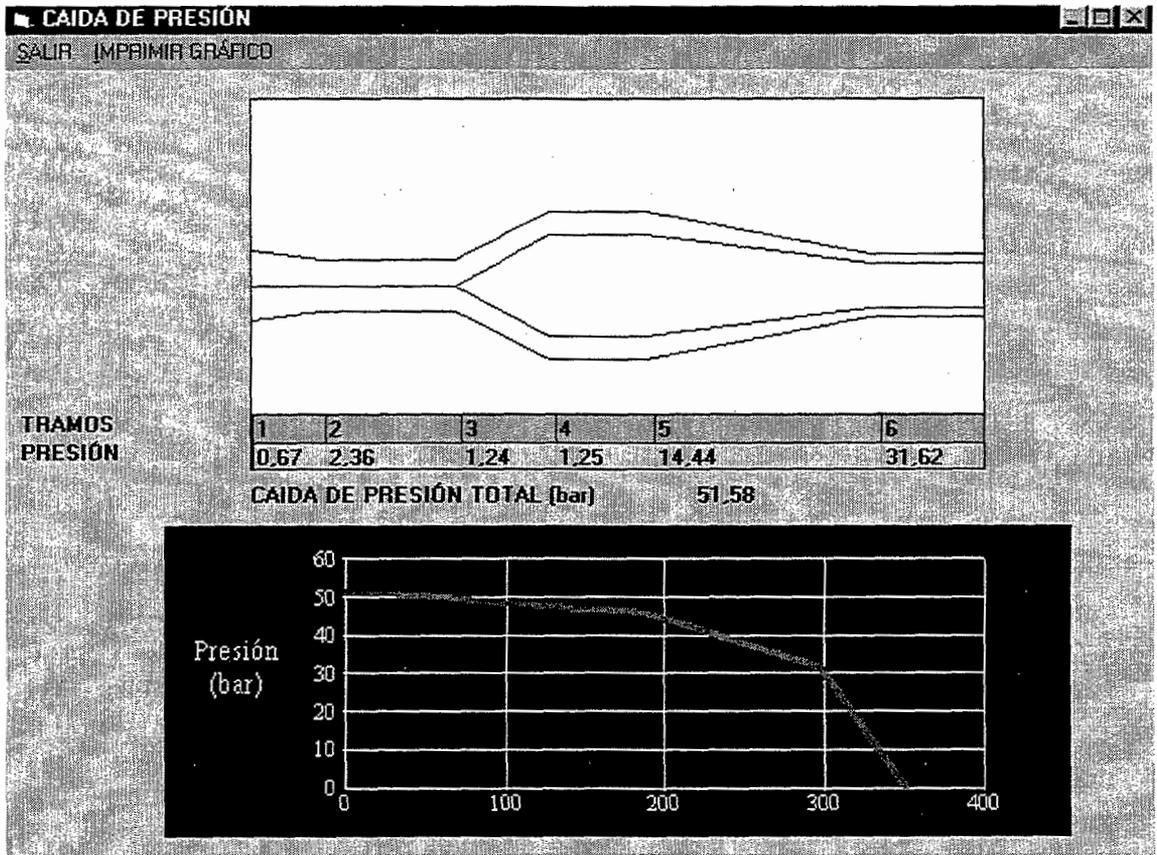
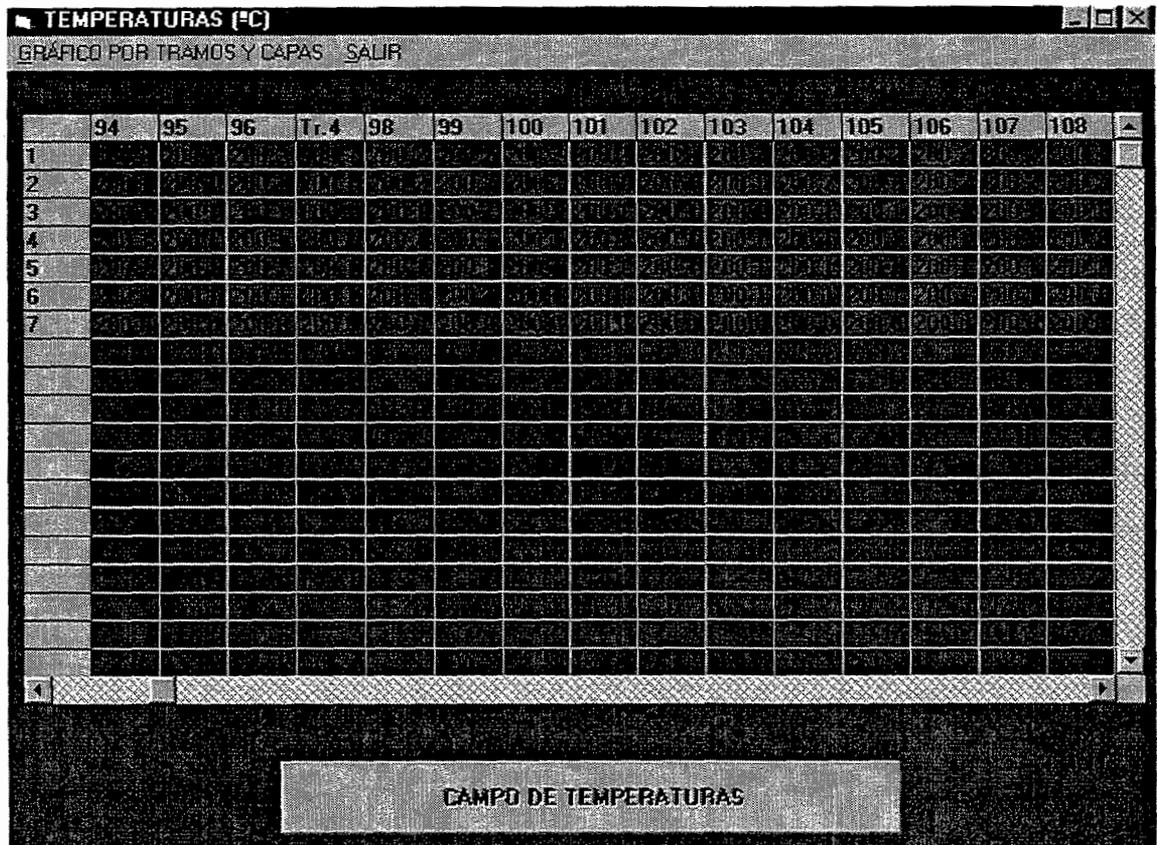


Fig.13.21.- Valores por tramo en forma de curva y en tabla de una dimensión.



13.22.- Valores en los nodos en forma de tabla de dos dimensiones.

c) Valores en todos los nodos en forma de tabla de dos dimensiones (Fig.13.22)

Se presentan los parámetros, tal cual son sus resultados numéricos y en las unidades más habituales, en todos y cada uno de los nodos que conforman la malla diseñada. La tabla tiene dos dimensiones representando las filas a las capas y las columnas a las secciones que avanzan a lo largo del cabezal. Para distinguir que sección coincide con el final de un tramo y comienzo de otro se indica en las filas con “TR” acompañado del número de tramo que corresponde. El número de tramo siempre indica el del último. Lógicamente y dado que el número de nodos puede llegar a ser bastante elevado la tabla no es rígida sino que mediante el control inferior nos podemos mover a lo largo de toda ella.

Este sistema de representación no da una información muy directa de lo que realmente pasa pero si en cambio tiene el rigor de indicar el valor numérico del parámetro. Para complementar este método se han diseñado otras dos fórmulas que sí son más directas en cuanto a la evolución de los resultados.

d) Valores en todos los nodos expresados en forma de gráfico de campo (Fig.13.23)

Permite observar la evolución de los resultados a la vez en todo el cabezal dándonos una información muy rica en cuanto a saber cuales son los puntos críticos de un determinado parámetro. Ésto se consigue mediante escalas de colores (que aparecen en la parte inferior con el rango que representan) con lo cual simplificamos la información numérica a determinados rangos o intervalos y de esta forma sacar mejores conclusiones. No es por lo tanto una herramienta tan útil para cuantificar pero sí lo es en cambio para tomar decisiones. La resolución del coloreado puede ser a nivel de mallado o a nivel de relleno como aparece en la Fig. 13.23.

Presenta los resultados en los nodos que corresponden a finales de tramos en forma de curva. El motivo de elegir estos nodos es porque los finales de tramo son puntos críticos en el cambio de geometría y donde normalmente ocurren los sucesos más interesantes; en las zonas de transición no hay picos sino cambios continuos de los parámetros.

En los sistemas c, d y e podemos ver reflejados prácticamente la totalidad de los parámetros como son la velocidad media, velocidad de cizalla, tensión de cortadura, temperatura, viscosidad y luego veremos también las deformaciones reversibles longitudinales y circunferenciales.

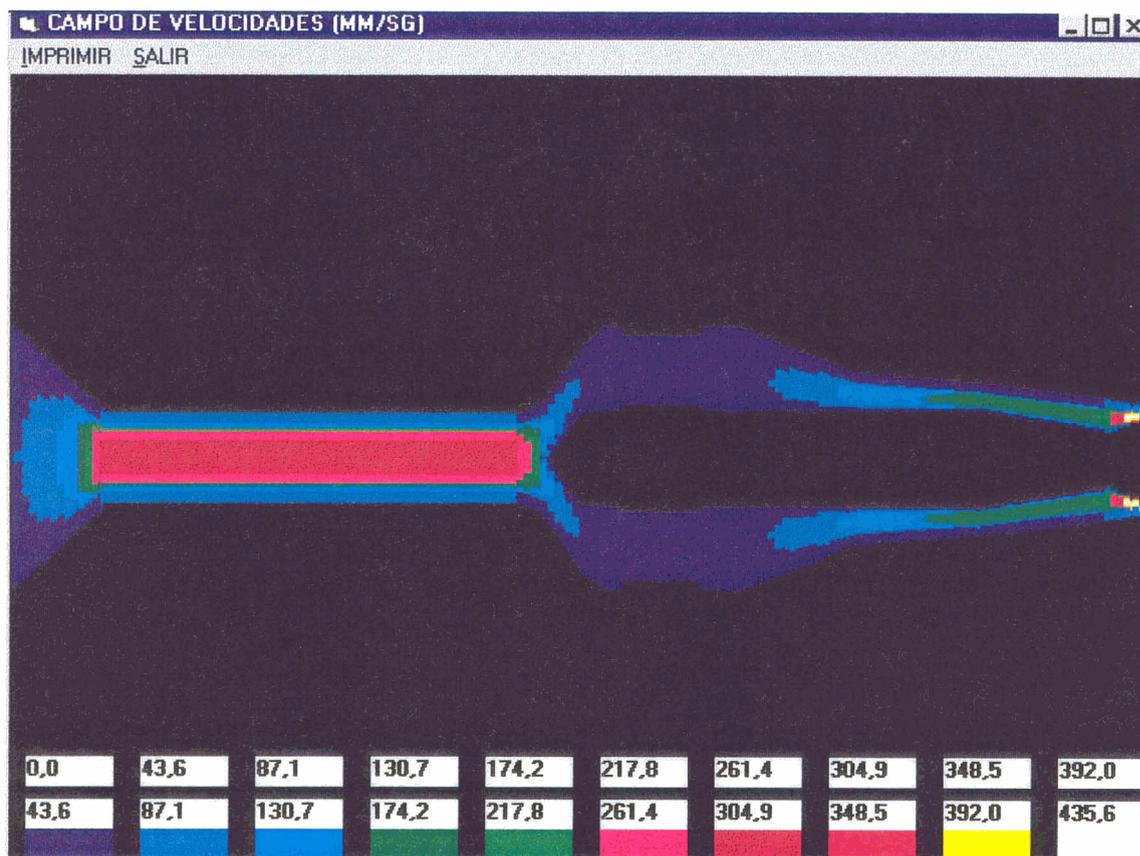


Fig.13.23.- Resultados en forma de campo con escalas según colores.

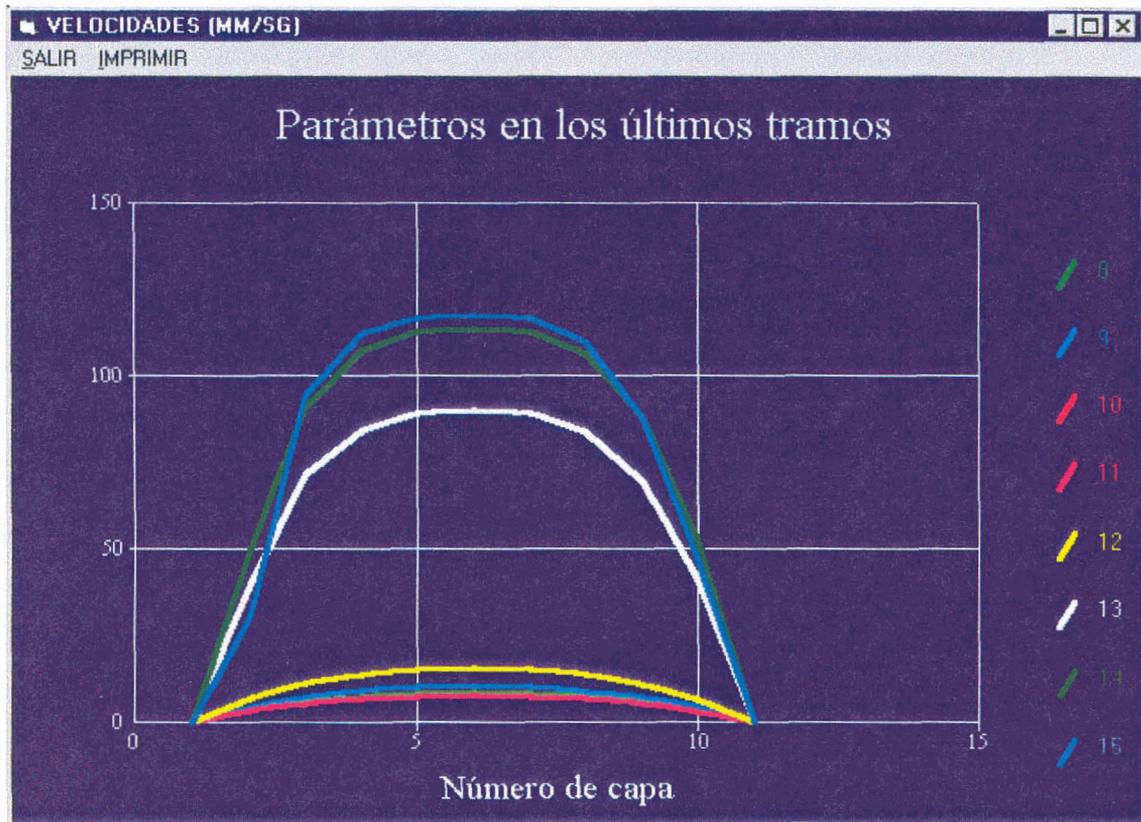


Fig.13.24.- Resultados en los nodos del final de cada tramo.

Presentación de resultados en los distribuidores espirales

El estudio y análisis de los distribuidores merecen un apartado especial por su complejidad. Es por este motivo por el cual se realiza un estudio aparte de los resultados que le afectan. Ya vimos en el menú “parámetros” como existe un submenú específico de distribuidor helicoidal. Son muchos los criterios a la hora de elegir como presentar los resultados para que nos sean útiles; nosotros mostraremos los elegidos para este programa pero no obstante haremos algún comentario sobre posibilidades alternativas.

Caudales

Tal vez sea este el punto donde existe una mayor variedad . Por su interés se distinguen tres casos:

a) Evolución del caudal saliente lateral (Leakage flow) a lo largo de la espiral

Criterio 1 [23] : Consiste en expresar a lo largo de la espiral el flujo saliente lateral , o sea, la diferencia entre entrada y salida, en términos de porcentaje en relación al entrante al principio de la espiral.

$$(\dot{V}_{sp}(n) - \dot{V}_{sp}(n+1)) \times 100 / \dot{V}_{sp}(1) \quad (13.16)$$

Criterio 2 [15]: El flujo saliente se mide como porcentaje de un valor medio por el cual se supone una salida del flujo lateral uniforme a lo largo de toda la espiral. Es decir, el 100% correspondería al ideal desde el punto de vista de salida del flujo.

$$(\dot{V}_{sp}(n) - \dot{V}_{sp}(n+1)) \times 100 / (\dot{V}_{sp}(1) / (N_0 \times nran)) \quad (13.17)$$

$N_0 \times nran = N^\circ$ de elementos espirales en una espiral completa

En DIEPLAST se ha optado por el criterio 2, reflejando estos valores en un curva en función del ángulo de giro de desarrollo de la espiral a lo largo del distribuidor (Fig. 13.25). Se suele decir que lo interesante es que el valor máximo de un buen diseño se encuentre en la zona intermedia de la curva.

b) Evolución del flujo anular a lo largo de toda la espiral (Fig.13.26)

Es el flujo que avanza en sentido anular pero que nosotros queremos representar tomando como línea de referencia una espiral completa. También podríamos haber tomado el camino de estudiarlo siguiendo una trayectoria recta y axial desde el inicio al fin. No obstante y para trabajar con coordenada de medición en grados (al igual que en el punto a) se ha optado por esta vía.

La definición adoptada consiste en expresar este caudal como porcentaje con respecto a un caudal medio teórico (volmedio) que es igual al caudal total del distribuidor (Q) dividido por el número total de elementos que existen en la periferia.

$$\dot{V}_{sl}(n + N_0) \times 100 / \text{volmedio} \tag{13.18}$$

c) Caudal a la salida del distribuidor en toda la periferia (Fig. 13.27)

Este si es un criterio donde todos los autores mencionados en la bibliografía se ponen de acuerdo, en el sentido de expresar que lo que nos interesa es una buena uniformidad del flujo axial que sale del distribuidor. Para ello definimos un caudal como porcentaje de un valor medio , o sea, el caudal total dividido por el número de elementos en la periferia (volmedio).

$$\dot{V}_{sl}(i) \times 100 / \text{volmedio} \tag{13.19}$$

En la medida que consigamos una desviación en porcentaje pequeña con respecto a un valor medio tendremos una buena uniformidad en las paredes del extrusado.

© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Biblioteca Universitaria, 2007

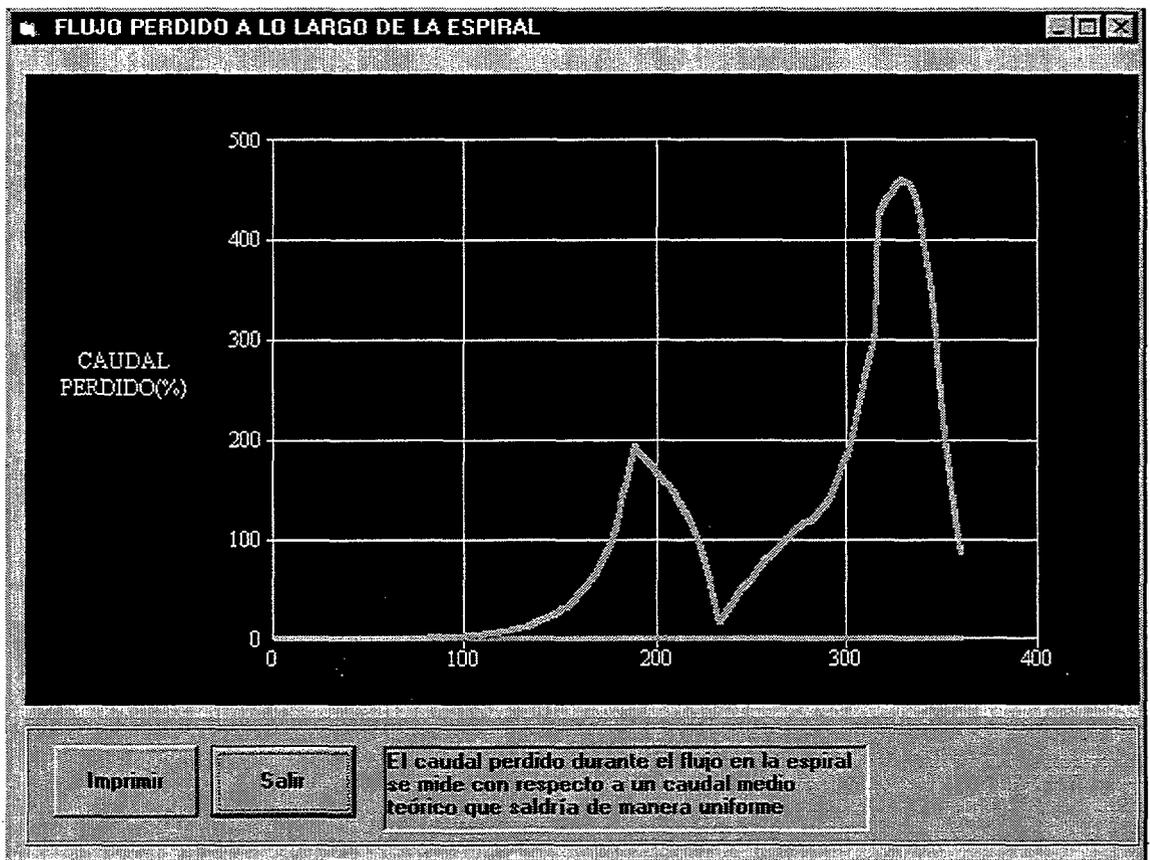


Fig.13.25.- Evolución del flujo lateral saliente a lo largo de la espiral.

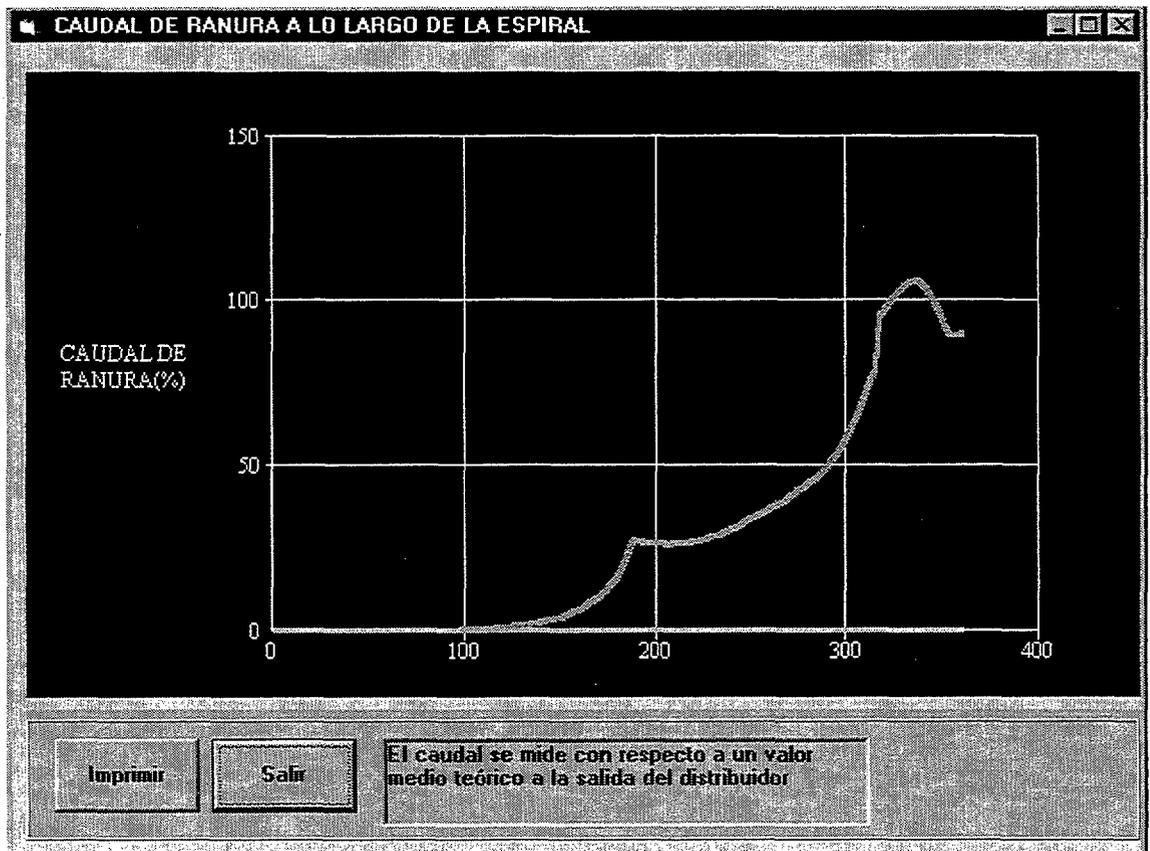


Fig.13.26.- Evolución del flujo axial medido a lo largo de la espiral.

Otros parámetros

Tomando como referencia el ángulo de desarrollo de la espiral se pueden medir otros parámetros que nos indiquen su idoneidad o nó. Entre ellos está la caída de presión en el canal espiral, la velocidad media en el canal espiral y anular, la velocidad de cizalla en la pared del canal espiral y anular, la tensión de cortadura en la pared del canal espiral y anular. Como ejemplo de alguno de ellos vemos la figura 13.28.

En relación a la caída de presión que a efectos del gráfico corresponde a la del canal espiral solamente (Fig.13.29). La que ocurre en el canal anular también es estudiada pero en su recorrido axial y rectilíneo, no a lo largo de la espiral. Esto es porque a efectos de cálculo de la presión total en el distribuidor se considera por un lado la que ocurre en la espiral y por otro la de diferentes tramos axiales de principio a fin y que están comprendidos en una porción del distribuidor (existen tantas porciones como espirales independientes). De estos tramos axiales se toma el más desfavorable y a su vez el valor que nos sale se compara con el de la espiral; el mayor valor es el que nos proporciona la caída de presión total del distribuidor.

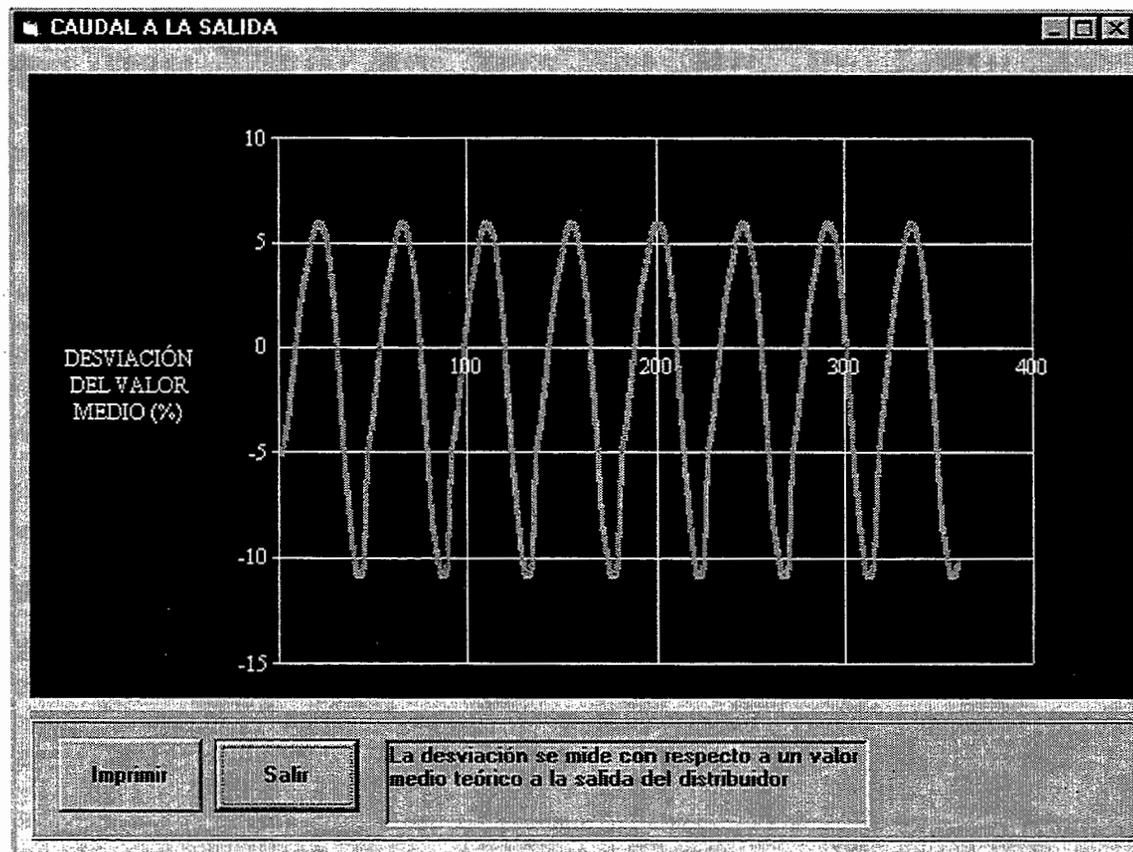


Fig.13.27.- Desviación del caudal axial a la salida de un valor medio.

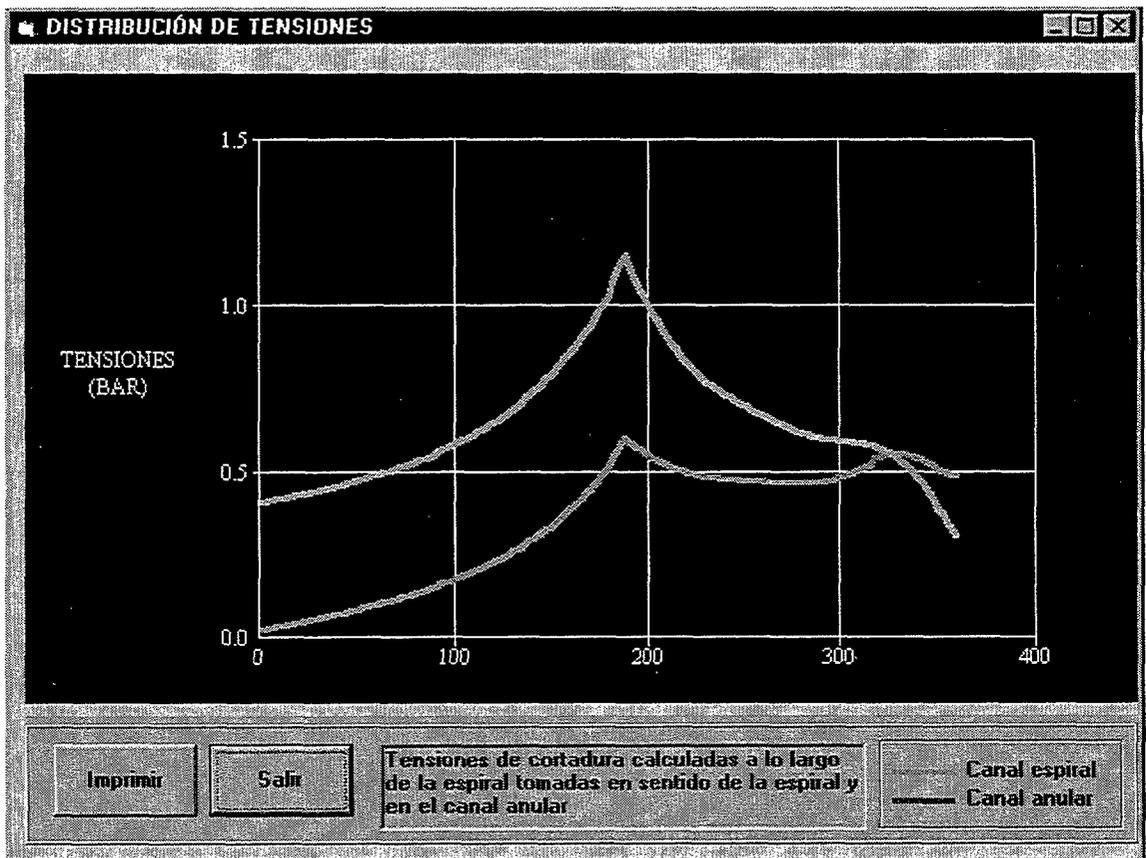


Fig.13.28.- Evolución de la tensión de cortadura en pared en canal espiral y anular.

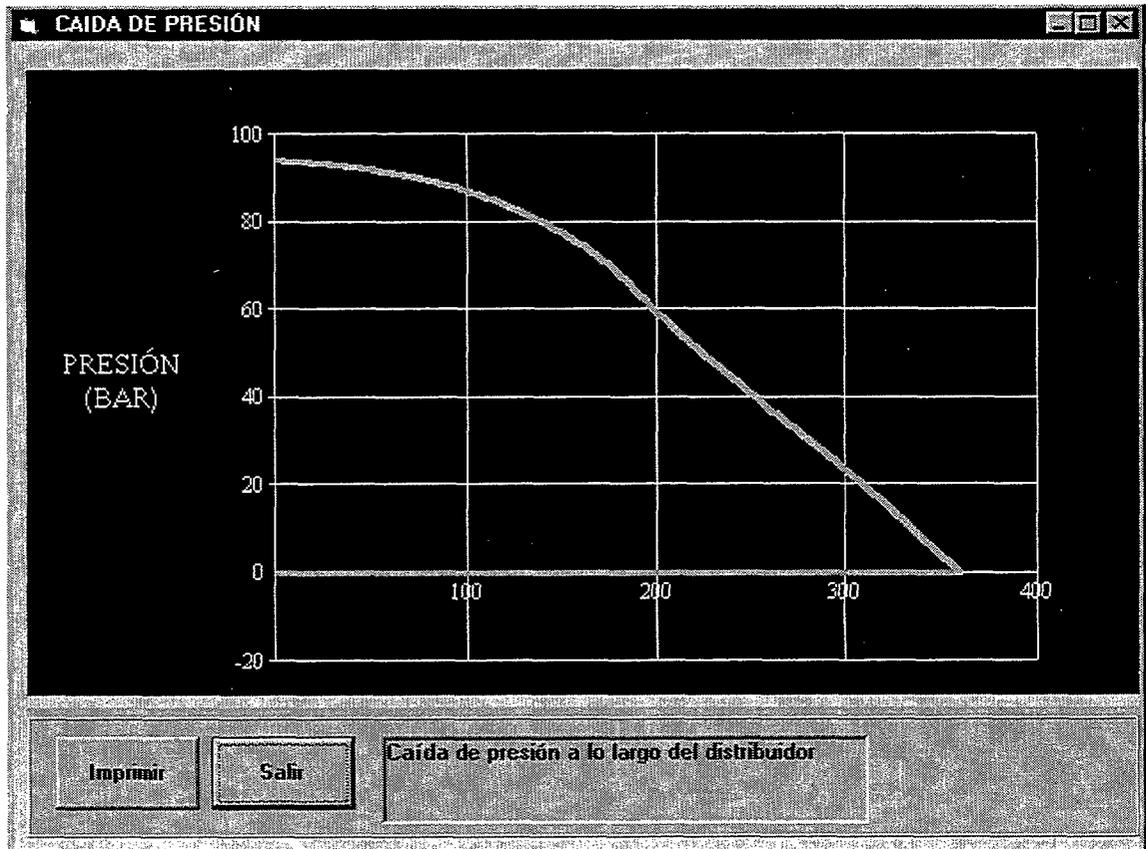


Fig.13.29.- Evolución de la presión en el canal espiral.

Análisis de las deformaciones

El estudio de las deformaciones del extrusado se efectúa desde tres puntos de vista. El primero tiene por objetivo principal la determinación del o los factores de hinchamiento (swell). El segundo una visión detallada de como se produce el proceso deformación-relajación en el interior del cabezal. El tercero realiza un estudio más amplio para diferentes condiciones de producción dándonos la curva producción-ensanchamiento.

Determinación de factores de hinchamiento

Se nos ofrece la posibilidad de utilizar los dos métodos implementados, el de W y J y el de Tanner. Con el de Tanner obtenemos simplemente los valores de los factores. En cambio con el de W y J podemos conocer más cosas dado que tenemos en cuenta la relajación del polímero. Por esto se ha diseñado un método por el cual podemos observar en función del tiempo transcurrido como se relaja el extrusado a la salida del cabezal. Claro está que este supuesto solo se puede hacer suponiendo que se cumplen unas condiciones que no son las reales en una extrusora. Estas condiciones, ya empleadas por Orbey y Dealy en sus experimentos con secciones anulares [38], consisten en suponer un medio fluido (por ejemplo aceite) a través del cual sale el extrusado, con una densidad y temperatura similar a la del polímero a la salida del cabezal.

En la figura 13.29 podemos observar la pantalla que aparece cuando desde *análisis* seleccionamos la opción *ensanchamiento del extrusado*. Tiene dos áreas bien diferenciadas, la *inferior* nos muestra valores fundamentales como son los factores de hinchamiento que afectan a la geometría en cuestión (recordemos que hay varios tipos de factores según la geometría), las dimensiones de equilibrio, es decir cuando se supone el extrusado completamente relajado en las condiciones teóricas comentadas. La parte superior se dedica a una simulación gráfica y numérica de lo que pasa durante la relajación del extrusado. En otras palabras la zona inferior indica el estado en equilibrio y la superior durante la relajación. Veamos cada una de ellas.

El estado de la pantalla como muestra la figura 13.29 es tal como queda al activar el comando *parámetros de relajación* . También se puede seleccionar el tiempo tomado como base para la simulación , bién un tiempo de relajación característico (ver expresión 11.17) o bién un tiempo límite establecido por el usuario.

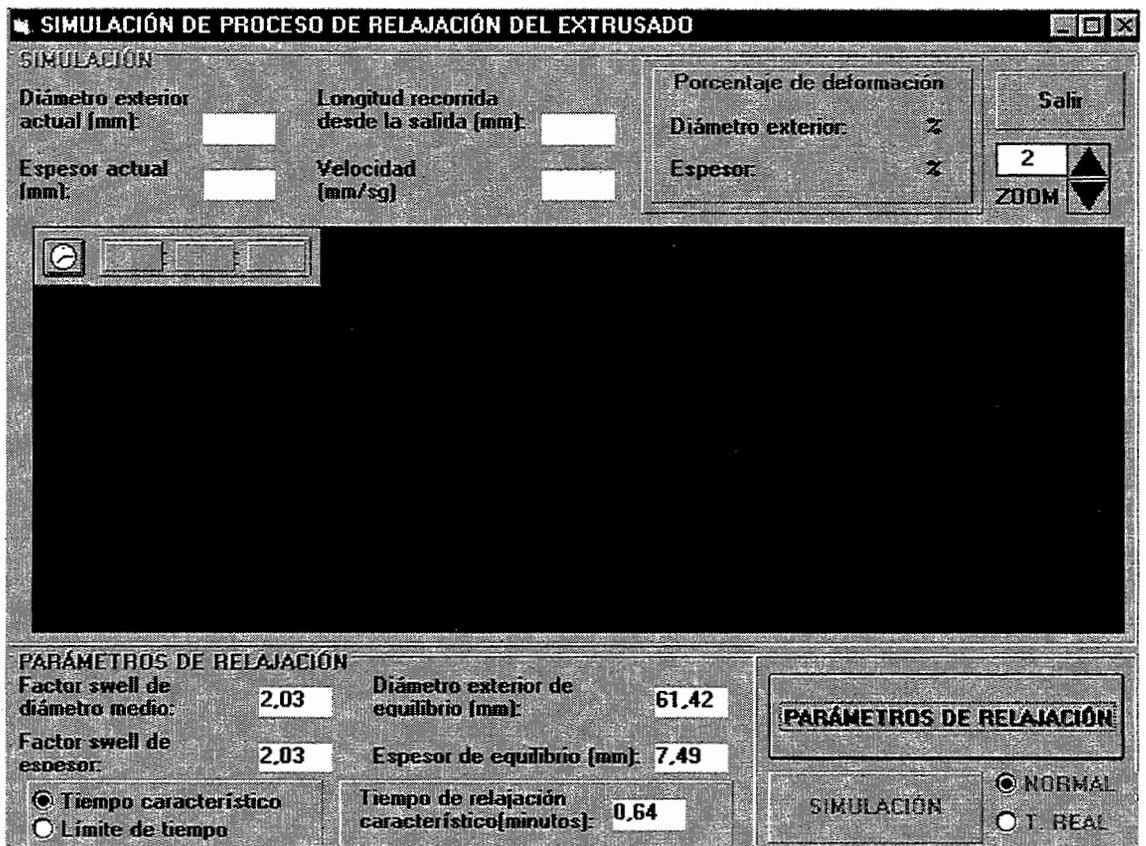


Fig.13.29.- Factores de hinchamiento y dimensiones de equilibrio.

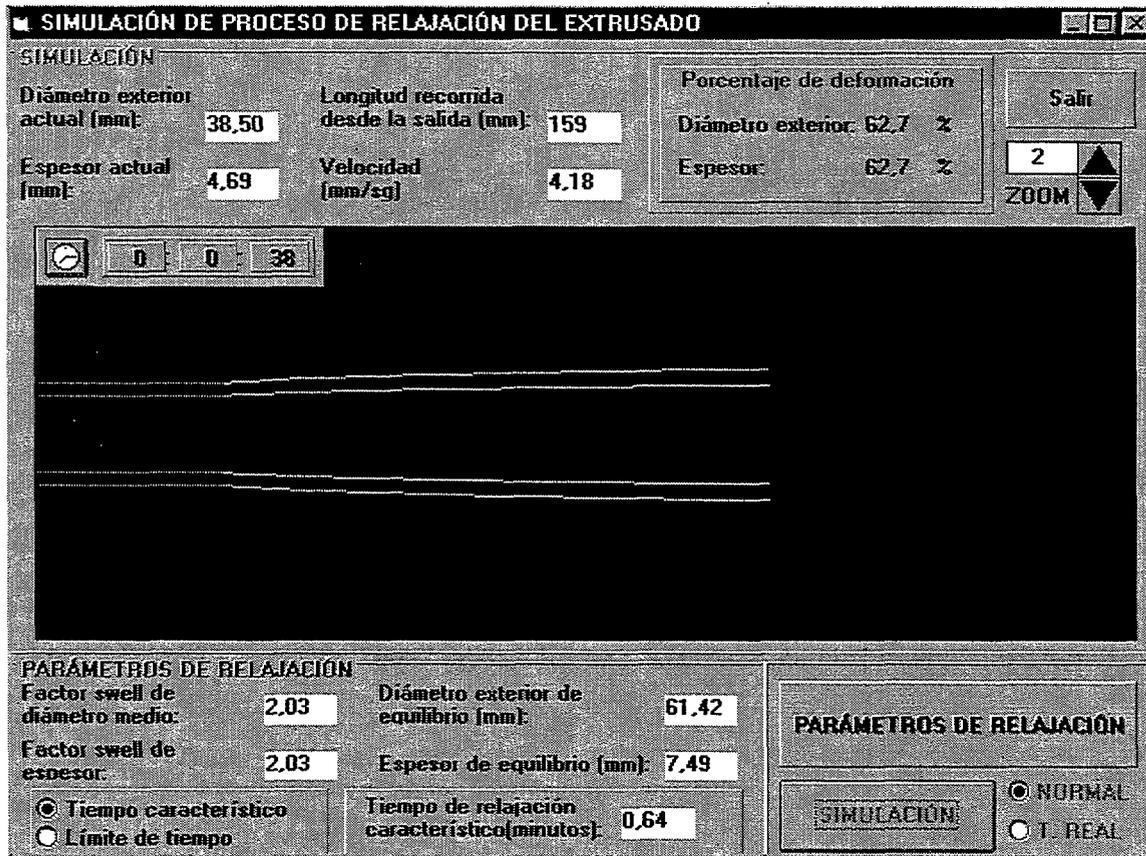


Fig.13.30.- Simulación del proceso de relajación del extrusado.

Si además pulsamos el comando *simulación* en la parte inferior se activa en la parte superior la simulación de la relajación (Fig.13.30). Es una simulación gráfica porque vemos a escala como va quedando el extrusado en el tiempo que hemos seleccionado previamente. Pero por otro lado también es una simulación numérica ya que nos indica para ese tiempo de relajación transcurrido:

- Dimensiones actuales.
- Porcentaje de relajación cubierto en relación a las dimensiones de equilibrio.
- Longitud recorrida por el extrusado.
- Velocidad lineal a la que avanza.

Dado que el dibujo de la simulación puede exceder el tamaño de pantalla podemos regular este mediante un zoom y así observar el tamaño total para todo el tiempo transcurrido. En cualquier caso un reloj situado en la zona gráfica indica en todo momento el tiempo al que corresponde el estado que vemos en el gráfico. Igualmente la

simulación gráfica y numérica puede efectuarse de una vez o en tiempo real (según seleccionemos abajo) con lo cual observamos segundo a segundo como va evolucionando el extrusado.

Deformaciones reversibles

Otra opción que se nos brinda es poder analizar en un gráfico de campo con escalas de colores como evolucionan las llamadas deformaciones reversibles (apartado 11.1) dentro del cabezal. Es un análisis ciertamente interesante ya que nos da una idea de como influyen determinadas zonas del cabezal así como los parámetros de trabajo en estas deformaciones, siendo muy típico, por ejemplo el fijarnos en la influencia de la zona de relajación final del cabezal. En figura 13.31 vemos como en esta zona de relajación el valor de la deformación tiende a ser menor y más aún si aumentamos su longitud (ha habido más relajación). La figura 13.31 indica las deformaciones reversibles longitudinales (ver expresión 11.4) y la 13.32 las circunferenciales (ver expresión 11.19).

Nos proporciona además los valores medios de la deformación reversible longitudinal a la salida que como sabemos es básico para determinar el factor de hinchamiento.

El gráfico de deformaciones reversibles longitudinales tal vez sea uno de los más representativos y claros de lo que realmente pasa en el interior del cabezal desde el punto de vista de la deformación.

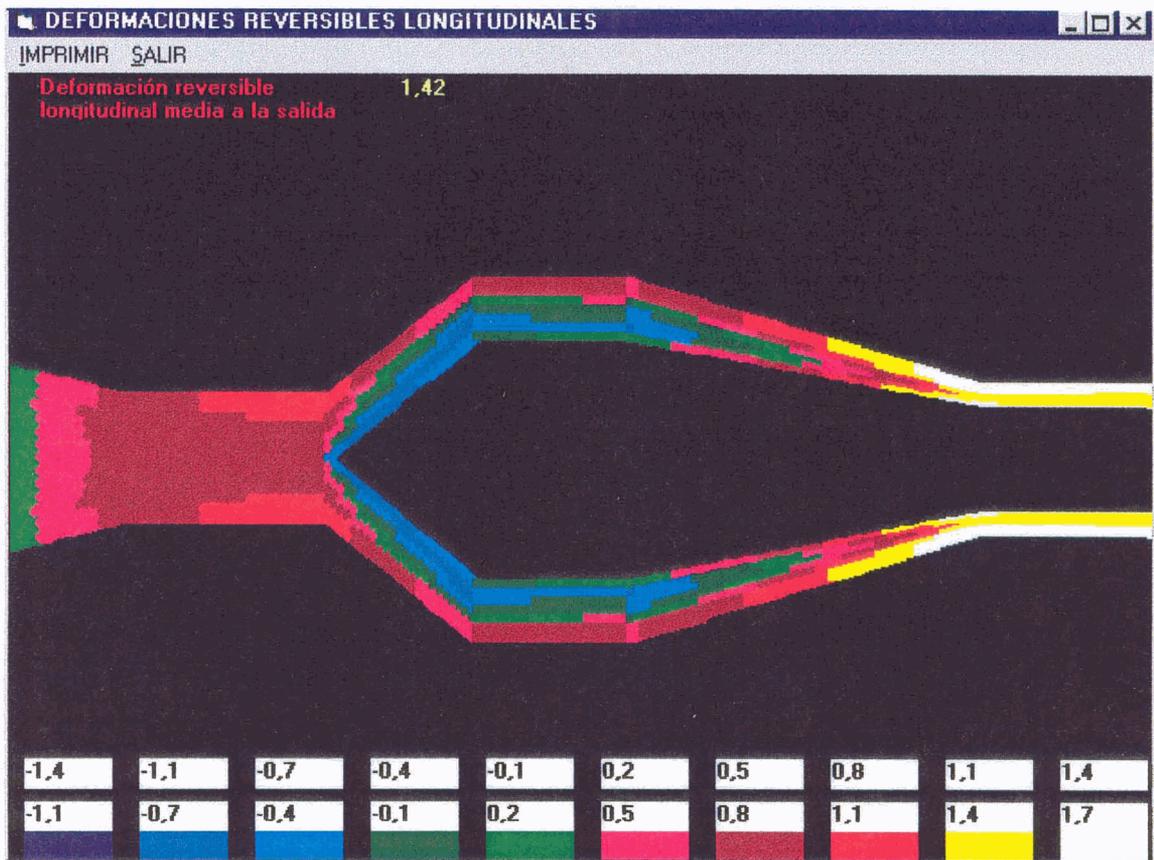


Fig.13.31.- Deformaciones reversibles longitudinales (utilizadas para estimar el Sw).

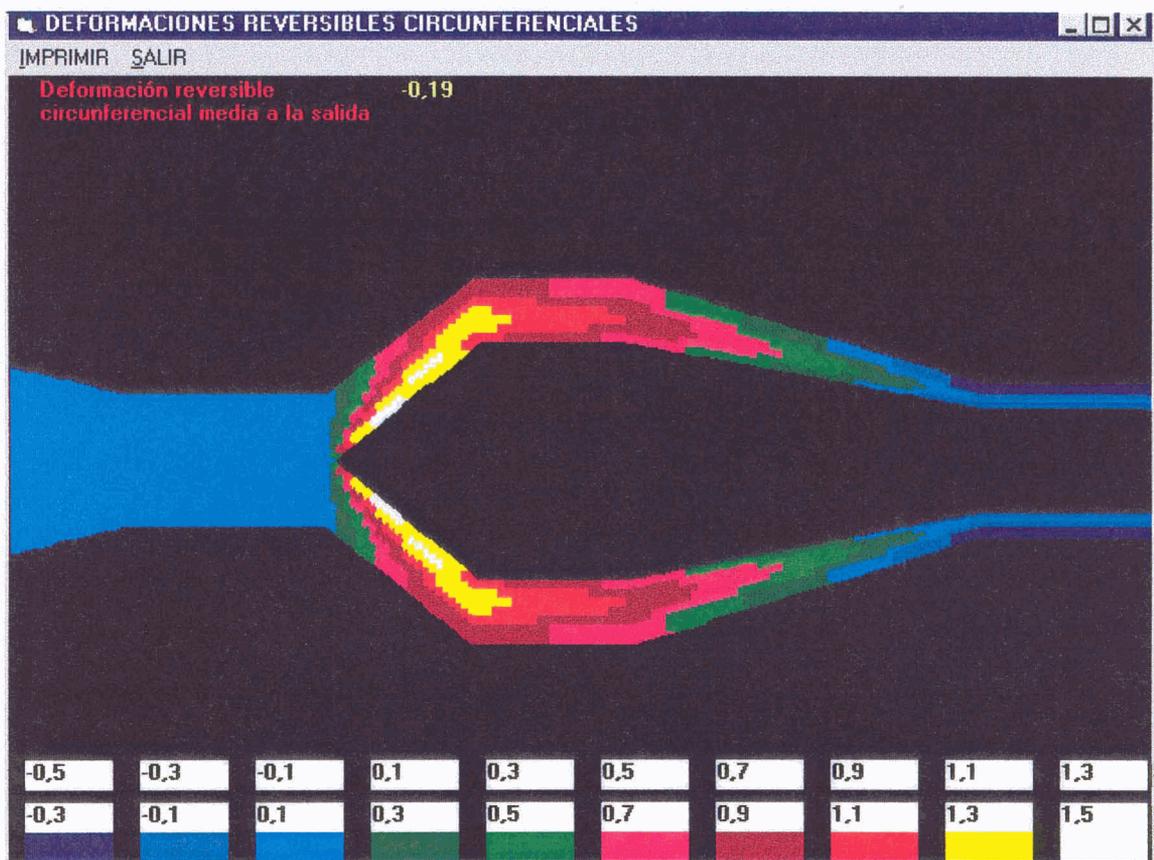


Fig.13.32.- Deformaciones reversibles circunferenciales.

Curva de producción-ensanchamiento (Fig. 13.33)

La idea viene a ser similar a la ofrecida por la curva característica del cabezal, solo que en este caso representamos el factor de hinchamiento (de diámetro si es geometría de revolución y espesor si es tipo ranura) en función de la producción. Es una curva que indica hasta que punto un aumento de producción incidiría de forma muy determinante en un aumento del factor.

Se nos permite seleccionar el método de cálculo que deseemos (W y J o Tanner). Introducimos el rango de producciones que deseamos estudiar teniendo cuidado ya que al utilizar un método numérico puede ocurrir que no todos los rangos tengan soluciones convergentes en todos sus puntos. El proceso de cálculo lógicamente es un poco más lento ya que el programa efectúa todas las iteraciones pertinentes para cada punto de la curva, no obstante por la rapidez de los ordenadores personales de hoy en día este hecho no representa más que unos pocos segundos.

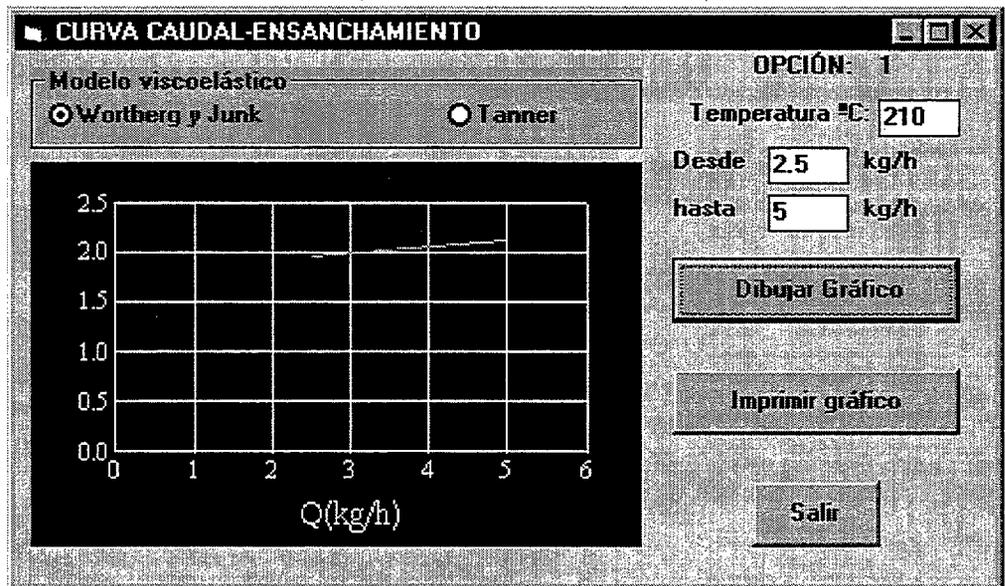


Fig.13.33.- Curva de producción-factor de ensanchamiento.

Áreas de trabajo

Entramos ya en el terreno de análisis de cabezales desde un punto de vista más global acotando sus posibilidades reales al integrarlo en una extrusora. Lo haremos utilizando una curva sencilla aproximada que es *la curva característica del cabezal* y por otro lado efectuaremos un estudio más complejo donde intervienen muchas variables que es el estudio del *área de trabajo del cabezal*. Realmente la curva característica del cabezal es un caso particular del área de trabajo.

Obtención de la curva característica del cabezal

En la opción del menú de la pantalla de análisis *punto de trabajo* seleccionamos el submenú *curva característica simple*. Nos aparece una pequeña pantalla (Fig.13.34) que dispone de una zona gráfica donde aparece la curva y campos para introducir la temperatura de masa de entrada y el rango de producciones deseado. Esta curva característica es para uso rápido por lo cual se crea a partir del método de las viscosidades representativas. Cuando se activa el comando *dibujar curva* se inician cálculos para varios puntos de trabajo con los cuales se va a crear la curva (presión en función de producción): Esta curva es básica para encontrar el punto de trabajo en relación al husillo de la extrusora.

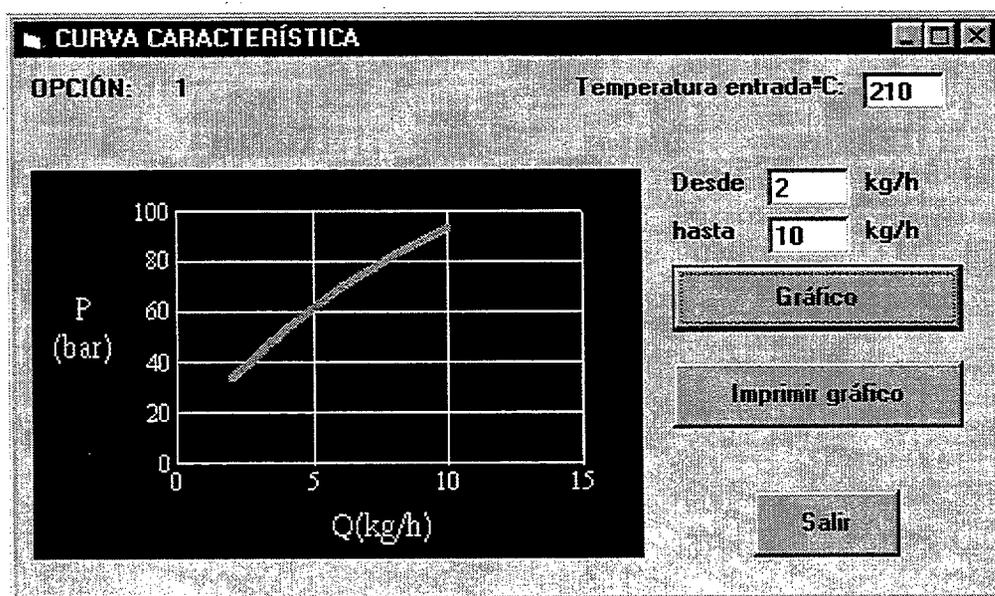


Fig.13.34.- Curva característica simple del cabezal.

Obtención del área de trabajo

El diseñador debe proporcionar no solamente una solución final del cabezal, con unas condiciones de trabajo y material determinados sino que debe indicar al usuario en que rangos de producción se puede mover para no sobrepasar por arriba y por abajo los límites máximos establecidos en el diseño. Esta información se puede desarrollar con la utilidad *área de trabajo* que proporciona DIEPLAST. Evidentemente es una herramienta también útil para el propio diseñador ya que a partir de unos límites establecidos por él va acotando las posibilidades del cabezal que está diseñando.

A partir de la pantalla de análisis, en el menú *punto de trabajo* y submenú *área de trabajo*, accedemos a poder visualizar gráficamente cual es dicha área. Para ello sobre un gráfico que muestra la curva característica del cabezal se dibuja una franja (Fig13.35) cuadriculada que marca donde se puede trabajar con este cabezal, o en otras palabras en qué rango de producciones. Por encima o por debajo de esta franja incumpliríamos las *restricciones límites*. ¿Cuales son las restricciones límites?, son las que se mencionan a continuación:

- * Tiempo de residencia medio máximo admitido para permanecer una partícula dentro del cabezal.
- * Temperatura máxima que puede alcanzar una partícula dentro del cabezal.
- * Velocidad de cizalla máxima admisible.
- * Tensión de cortadura máxima admisible.
- * Presión máxima .
- * Factor de ensanchamiento máximo admisible (de diámetro en el caso de geometrías de revolución y de espesor en el caso de ranuras).

Todas estas restricciones son introducidas por el diseñador en base a su experiencia personal, por indicaciones del fabricante del material o por restricciones impuestas por el peticionario del diseño. La única restricción que limita por debajo (a excepción lógicamente de una producción mínima exigida) es el tiempo de residencia ya que a menos producción mayor tiempo de residencia.

El usuario además de las restricciones debe introducir el rango de producción que quiere estudiar; el resto de datos se toman de los que estén activos en ese momento (material, temperatura, etc). El método de cálculo utilizado también será el que se encuentre seleccionado en la pantalla de análisis siendo el numérico como es natural el más completo. Con todo esto DIEPLAST realiza todos los cálculos para diferentes puntos de la curva y compara los resultados con los valores límite. De esta forma obtenemos un área útil donde se cumplen todas las restricciones.

En la misma pantalla se muestran los valores límites de producción así como la presión correspondiente a cada uno. Si quisiéramos afinar aún más el área de trabajo y dado que los puntos que se calculan en la curva son discretos, podemos introducir como nuevo rango de producción el obtenido como límite y así tener un área de trabajo más ajustada.

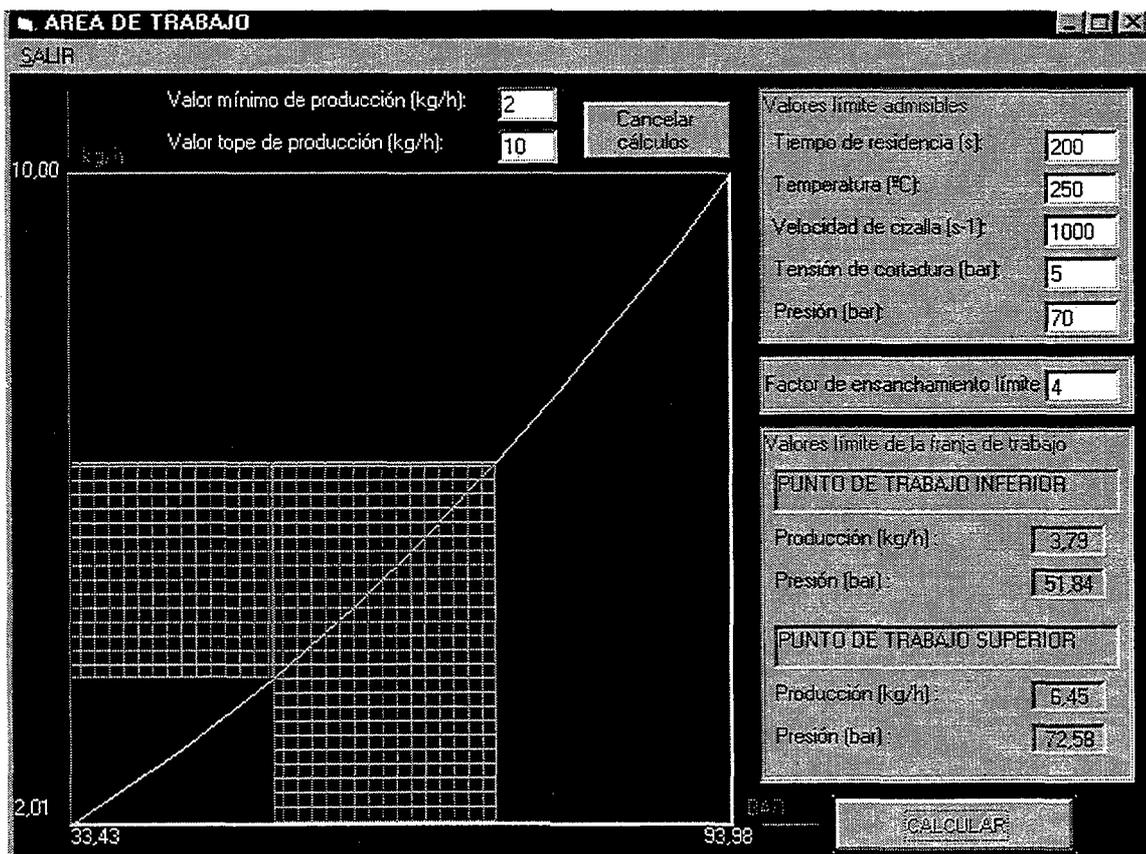


Fig.13.35. Área de trabajo posible

Comparación de soluciones

Como último punto de esta estructura que de forma resumida hemos visto en DIEPLAST tenemos un apartado del programa que nos va a servir como complemento para tomar decisiones de una manera más sencilla y ordenada. Se trata de la posibilidad de sintetizar todos aquellos parámetros que creemos más básicos y mostrarlos en una tabla (Fig. 13.36). Pero no solo mostrarlos sino además poder compararlos con las otras opciones que hayamos pensado que son más aceptables. Estos parámetros fundamentales ya los hemos comentado en el apartado 6 de la memoria. Para acceder a esta posibilidad lo hacemos desde la pantalla de análisis.

COMPARACIÓN DE OPCIONES

SALIR

OPCIONES DEL PROYECTO: COMPARADAPROYECT-IBRECTO.DIE

| | Opción1 | Opción2 | Opción3 | | |
|---|---------|---------|---------|--|--|
| PRODUCCIÓN (kg/h) | 1,728 | 3,456 | 7,2 | | |
| Tª DE ENTRADA (°C) | 170 | 170 | 170 | | |
| CAIDA DE PRESIÓN (bar) | 76,41 | 92,79 | 111,92 | | |
| VELOCIDAD DE CIZALLA MÁXIMA EN PARED (s ⁻¹) | 48,97 | 104,23 | 218,01 | | |
| TENSIÓN DE CORTADURA MÁXIMA EN PARED(bar) | 0,82 | 1,01 | 1,22 | | |
| TIEMPO MEDIO DE RESIDENCIA (s) | 7,74 | 3,87 | 1,86 | | |
| ∑ ENSANCHAMIENTO DIÁMETRO MEDIO | 1,53 | 1,59 | 1,64 | | |
| DIÁMETRO EXTERIOR DE EQUILIBRIO (mm) | 19,41 | 20,16 | 20,78 | | |
| ∑ ENSANCHAMIENTO ESPESOR | 1,53 | 1,59 | 1,64 | | |
| ESPESOR DE EQUILIBRIO (mm) | 2,43 | 2,52 | 2,60 | | |

Fig.13.36.- Comparación de opciones.

14.- PROCESO DE DISEÑO UTILIZANDO “DIEPLAST”

14.1.- Aportación desde un punto de vista metodológico.-

El establecer una nueva metodología de diseño de cabezales es tal vez una de las mayores aportaciones de DIEPLAST. Esta metodología se basa en los siguientes pilares:

- Metodología de diseño gráfico de cabezales.
- Metodología de gestión de ficheros (proyectos, opciones, geometrías, etc).
- Metodología de preparación de datos de entrada.
- Metodología de análisis e interpretación de resultados.
- Metodología de comparación de soluciones y definición de área de trabajo.

Es importante destacar este apartado como punto de arranque en el desarrollo de un programa puesto que se corre en muchas ocasiones el riesgo de crear el método de trabajo a partir de los condicionantes que establece el propio programa.

No obstante y aunque se ha tratado de sistematizar al máximo no se puede decir que el método general de trabajo sea único en cualquiera de los pilares señalados anteriormente. Esto que en principio pudiera parecer un contrasentido no lo es tanto dado que esta dinámica es inherente a todo proceso de diseño. El diseño no es algo lineal y unívoco, lo que pasa es que sí se pueden establecer pautas de comportamiento. En el siguiente apartado intentaremos explicar de manera orientativa como podría ser una sistemática de trabajo con DIEPLAST. También veremos como se proporciona una gran flexibilidad que es de agradecer sobre todo por los usuarios que tienen un alto grado de creatividad.

Esta dualidad de *rígido-flexible* desemboca en algo muy presente en DIEPLAST y es que por la forma de trabajar existe la posibilidad de hacerlo en algunas áreas de una forma rígida (diseño dirigido) y en otras de una forma flexible (diseño interactivo). las dos fórmulas se entremezclan a veces en DIEPLAST no estando la frontera muy clara.

14.2.- Sistemática de trabajo.-

En este apartado daremos unas pautas generales sobre como se trabaja con DIEPLAST. No es tanto el analizar en detalle el funcionamiento del interface de usuario (ya incluido al ver la estructura del programa) sino en establecer criterios o normas de funcionamiento sobre las cuales el diseñador tendrá luego completa libertad para proponer su manera particular de plantear esta sistemática.

14.2.1.- Organización del proyecto.-

Antes de entrar en los diferentes caminos que podemos seguir hay que organizar toda la información que vamos a manejar para que nos sirva tanto en el presente como en el futuro. Por eso se ha establecido una jerarquía de ficheros y almacenamiento de información.

El nivel más alto corresponde al concepto de *proyecto* . Nosotros entendemos por *proyecto* a un trabajo que engloba muchas posibilidades. Viene a ser por ejemplo el encargo de una empresa que desea que diseñemos un cabezal para cubrir una necesidad; pues bien, esta necesidad origina un proyecto al que le daremos un nombre. A efectos de identificación como fichero el programa le incorpora la extensión *.die.

El siguiente nivel es el de *opción* . Una *opción* representa un camino elegido dentro de un proyecto, que puede tener innumerables opciones. La opción para que quede incluida dentro del proyecto debe ser salvada previamente. No siempre las probaturas que se hacen desembocan necesariamente en una opción ya que salvaremos la opción cuando ésta nos interese realmente. Las opciones se ordenan por números que son asignados automáticamente por DIEPLAST. No son ficheros en sí mismo ya que todas ellas se almacenan en un fichero de proyecto. No obstante al igual que los *.die se pueden borrar, crear, guardar.

Otro nivel de almacenamiento de información son los ficheros de *geometría* que son independientes de los ficheros de proyecto. Los ficheros de geometría (*.geo) pueden ser creados sin necesidad de pertenecer a un proyecto, incorporándose a éste cuando se desee.

Por último tenemos los ficheros de *resultados* (*.dat) que al contrario de los ficheros de proyecto incorporan la totalidad de los resultados.

La información que almacena la estructura proyecto-opciones se refiere a los datos de entrada (condiciones de trabajo, material, definición de malla, etc) y a un resumen de los resultados que aparecen en la tabla de comparación. es decir, si recuperamos un proyecto y de éste una opción habría que ejecutar los cálculos de nuevo para obtener todos los parámetros completos. Se optó por independizar el fichero de datos del de proyectos para hacer este último más operativo dejando solo la información útil para tomar decisiones. Tengamos en cuenta que conocer los resultados completos una vez recuperado un proyecto con sus opciones simplemente consiste en iniciar el proceso de cálculo que al ser tan rápido no implica ninguna pérdida de tiempo adicional.

La estructura adoptada la mostramos en el siguiente esquema.

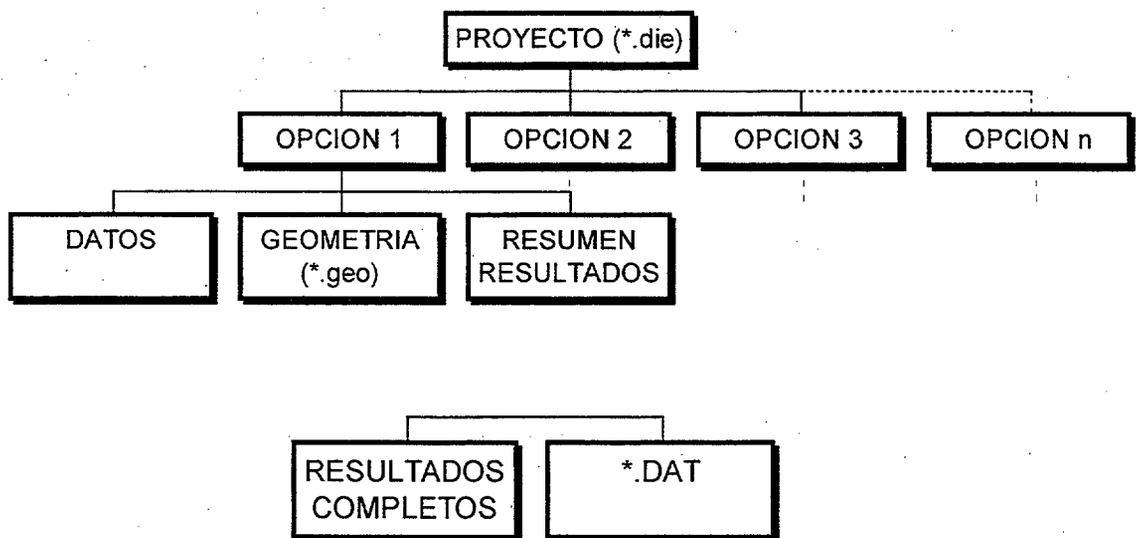


Fig.14.1.- Organización general del proyecto

14.2.2.- Inicio y desarrollo de un proyecto.-

Antes de introducirnos en el programa hemos de realizar un completo estudio de las especificaciones de diseño previas (capítulo 6) que vendrán planteadas desde una necesidad. Tengamos en cuenta que pueden existir limitaciones impuestas a priori, material, tipología constructiva del cabezal, limitaciones de la extrusora, etc. Todos estos factores han de tenerse muy claros para evitar soluciones poco útiles.

De entrada podemos distinguir dos escenarios:

- 1.- Estudio pormenorizado del cabezal para unas condiciones puntuales de trabajo.
- 2.- Estudio general del cabezal para un rango de trabajo. Área de trabajo.

El primer escenario es el más profundo y se realiza para una producción determinada. Esta producción en principio puede marcarse como la deseada por el usuario desde el punto de vista de la empresa. El segundo escenario no es tan profundo pero si ofrece una panorámica más amplia del comportamiento del cabezal para diferentes producciones. El distinguir estos dos escenarios no significa que necesariamente se realicen de forma independiente puesto que de hecho en algunas ocasiones el usuario pasa de uno a otro casi sin darse cuenta.

Empecemos por el primer escenario

14.2.2.1.- Estudio pormenorizado para unas condiciones puntuales.-

Preparación previa. Base de datos

Como punto de inicio es recomendable acceder a la base de datos y asegurarnos de que los materiales que vamos a probar aparecen en la misma y que todos aquellos datos que sean necesarios estén completos. No olvidemos que existen algunos parámetros que no siempre se disponen para todos los polímeros. Recordemos como

ejemplo los de deformación de W y J [3,33]. Hay parámetros absolutamente necesarios para un estudio mínimo y otros que impiden un estudio parcial.

A efectos de diseño en muchas ocasiones podríamos recurrir a extrapolar algunos parámetros del polímero de un fabricante a otro con la idea de un error no excesivamente grande. Pero esta idea es siempre según criterio del diseñador pues depende de lo que quiera conseguir. También resulta interesante la caracterización del polímero con más de un modelo viscoso ya que posibilita un análisis más rico y amplio.

Una poca rigurosa base de datos de materiales puede hacer variar los resultados de una manera muy apreciable y es por ello que se ha de cuidar enormemente.

Inicio de un nuevo proyecto

Para iniciar un proyecto lo hacemos desde la pantalla de arranque entrando como *nuevo* si lo que deseamos es recuperar uno ya anterior entraremos por *abrir proyecto*. Para no complicar en exceso esta primera aproximación supondremos que se trata de un proyecto nuevo. Esta acción nos lleva a la pantalla de *análisis*.

En *análisis* creamos una nueva opción (por defecto la N° 1). A partir de aquí se inicia un proceso de introducción de datos; este proceso cambiará en función de si vamos a seleccionar método numérico o aproximado. Como norma general parece lógico iniciar con el método aproximado a manera de predimensionado para concluir posteriormente con el numérico. Lo cierto es que con los ordenadores personales de hoy en día la diferencia en tiempo de cálculo entre uno y otro es bastante pequeña.

Supongamos el más general, o sea, el numérico; podemos seguir diferentes caminos; uno de ellos puede ser el acceder al menú de edición de geometrías en el supuesto caso de no tener ninguna creada de antemano. Al entrar en esta opción ya hemos de elegir el tipo de geometría, de revolución o rectangular.

La definición de la geometría puede ser todo lo sencilla o compleja que queramos en función del conocimiento previo de la misma (tener una idea bastante

clara) o de solo tener una vaga idea. Claro esta que no es conveniente en principio hacer un alarde de inventiva despreciando las tendencias habituales en el estado de la técnica. En cualquier caso DIEPLAST da campo al diseñador más avezado e imaginativo.

La filosofía de trabajo en lo que a crear geometrías se refiere es muy simple, ir tramo a tramo, insertando el distribuidor o difusor cuando creamos conveniente. tal vez sea aconsejable no obsesionarse de entrada con unas dimensiones muy cerradas ya que una modificación y ajuste posterior es bastante simple en función no solo de las restricciones de tipo constructivo sino del propio proceso prueba-error en el que entramos en DIEPLAST.

La iniciativa de definición geométrica en general la lleva el usuario pero existe un caso, el distribuidor variable para cabezales tipo ranura, donde se crea semiautomáticamente a partir de restricciones (por ejemplo presión o alguna dimensión) introducidas por el usuario. En otras palabras se relaciona la geometría con datos de funcionamiento, hecho que no ocurre normalmente.

Tenemos la opción de utilizar las ayudas que proporciona DIEPLAST que orientan con una cierta automatización al diseñador. Esta ayuda vista en el capítulo 13 se basa en un estudio realizado por el autor en cuanto a qué se recomienda por parte de los expertos y en función de la experiencia acumulada. Las posibilidades son infinitas y lógicamente se reducirán bastante en la medida de la experiencia profesional del diseñador.

Es recomendable guardar el fichero de dibujo (*.geo) aún no siendo el definitivo ante cualquier eventualidad o problema. Terminada esta fase de *prediseño* volvemos a la pantalla de análisis.

En este contexto introducimos en los campos los valores de temperatura de masa a la entrada, temperatura de pared del cabezal y producción deseada. Nos introducimos en la base de datos de materiales a través del icono correspondiente y seleccionamos el

apropiado. Al salir de dicha base de datos volvemos a *análisis* y ya vemos como aparece el material.

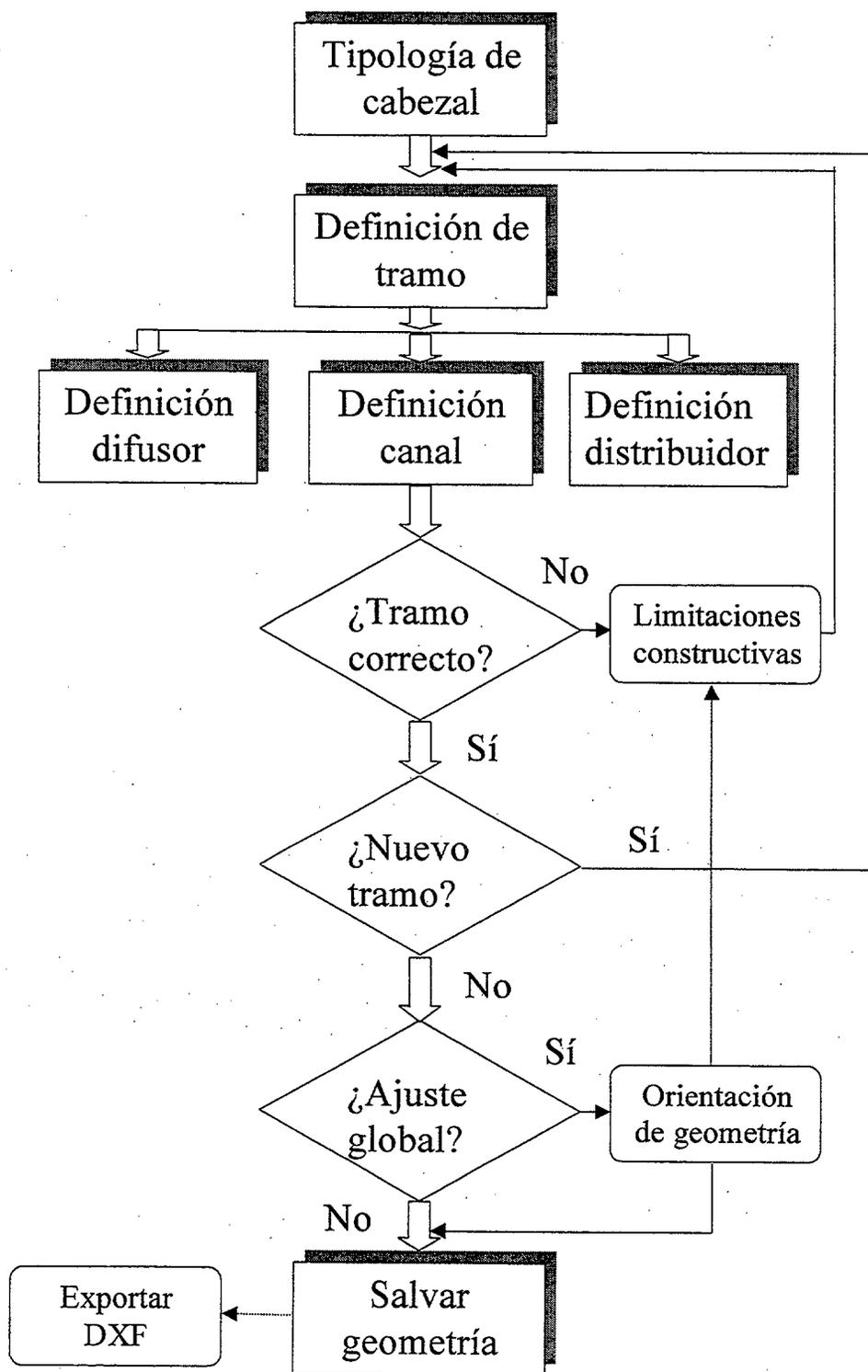
Al haber elegido la opción *numérico* debemos definir el mallado para lo cual accedemos a otra pantalla. Recordemos las dos posibilidades que se nos ofrecía (capítulo 13). El nivel de refinamiento del mallado es seleccionado por el usuario con intervalos constantes en todos los tramos o variable si se ha optado por garantizar una cierta convergencia de la solución.

Llegados a este punto disponemos de los suficientes recursos para poner en marcha la extrusora. En el caso de no converger la solución se nos indica mediante mensaje; ello obliga a volver a definir el mallado o modificar otros datos. La falta de cualquier dato de entrada (material, producción, geometría, etc) es indicada mediante alarmas gráficas y textuales. Un error general de los cálculos por motivos no habituales (operaciones indebidas, etc) implica un mensaje solicitando la revisión de los datos de entrada.

Si conseguimos que el piloto verde se encienda significa que los cálculos han concluido con éxito y ya pasamos a la fase de análisis de resultados.

Nos volvemos a encontrar con múltiples posibilidades. Evidentemente hemos de tener una cierta claridad de objetivos sobre que es lo que se quiere, cual es el o los parámetros que más condicionan. Este aspecto referente a la toma de decisiones se ha comentado en los apartados 6.2 y 6.3.

Se entra en una fase ciertamente impredecible, donde el diseñador se introducirá en tablas de resultados, curvas, gráficos de campo, etc, sacando conclusiones sobre lo que pasa.



© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Biblioteca Universitaria, 2007

Fig.14.2.- Proceso de creación de geometría

En función de estas conclusiones y de una manera interactiva con el programa entramos en una dinámica que podría llegar a ser engorrosa pero que con DIEPLAST es bastante flexible y agradable. La mayor o menor capacidad del diseñador es lo que va a marcar principalmente la duración de este proceso. Todas las variables, incluso el material, son susceptibles de ser modificados hasta llegar a un resultado que no queremos de momento calificar como óptimo. El usuario llega a una posibilidad o en nuestro lenguaje una *opción posible*, seguramente no la mejor pero si posible. Esta opción, con toda la información que conlleva se debe grabar para no perder el trabajo realizado.

A partir de aquí podríamos crear una nueva opción (la N° 2), donde podemos aprovechar parte de la anterior pero con modificaciones. Repetimos todo el proceso hasta llegar a otra solución en principio válida. Volvemos a grabar y así sucesivamente.

Con diferentes opciones estaríamos en un segundo estadio de decisión ¿Con qué opción nos quedamos?; aquí entra en juego la intercomparación de opciones. Para esto se utiliza una tabla resumen donde se indican para cada opción y de forma sintética aquellos aspectos más relevantes de cada una y que nos ayude a tomar decisiones rápidas y sencillas. Esta utilidad aparece en el menú de la pantalla de análisis (ver estructura) y es condición necesaria haber grabado previamente las opciones del proyecto (o recuperar un proyecto grabado).

Si nos interesa grabar los resultados completos lo podemos hacer y por supuesto antes de abandonar el programa o iniciar un nuevo proyecto debemos grabar el actual con su nombre (*.die).

A modo de resumen podemos ver lo expuesto en la Fig. 14.3

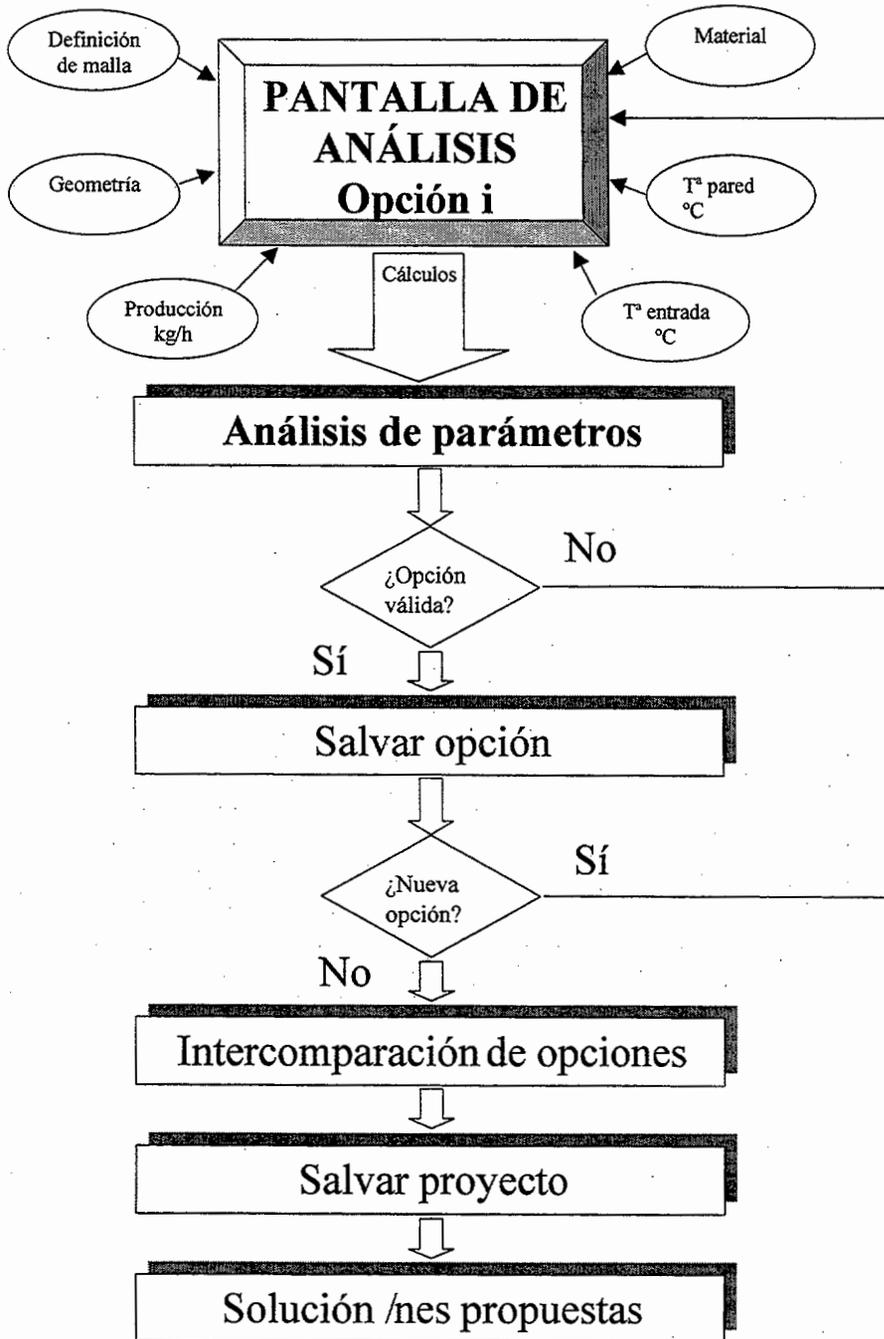


Fig.14.3.-Proceso de análisis para condiciones puntuales

14.2.2.2.- Estudio general del cabezal para un rango de trabajo.-

Además de profundizar en unas condiciones de trabajo específicas, que significa un mayor conocimiento del comportamiento del cabezal, es indudable que el diseñador debe prever un escenario más amplio aunque solo a nivel de unos pocos parámetros básicos. Surge así el concepto de curva característica y área de trabajo. El concepto de curva característica es bastante usual en sector de la extrusión ya que nos proporciona información acerca de la respuesta del cabezal para diferentes producciones (recordemos el apartado 3.1). Con esta curva y de acuerdo a las curvas del husillo podemos determinar las posibilidades reales de producción. Se pudiera dar la circunstancia de no poder llegar a una producción deseada debido a las características de la extrusora. En cualquier caso la curva del cabezal es un dato a suministrar al transformador.

Para entrar en este aspecto simplemente entramos en las opciones que en el menú de análisis se marcan como punto de trabajo. Elegiremos el submenú *curva característica simple* y estableciendo un rango de producción podemos visualizar gráficamente o imprimir dicha curva.

En este contexto podemos ir más allá y es no solo obtener la curva característica sino también sobre ella indicar en qué rango podemos utilizar este cabezal sin incumplir una serie de restricciones (submenú área de trabajo). Las restricciones son introducidas por el usuario en la pantalla correspondiente y se relacionan directamente con los criterios de diseño (capítulo 6, apartado 6.2). El área posible aparece dibujada con una franja y en el caso de no ser posible aparece un mensaje. En este último caso reiniciaríamos un proceso de ajuste de datos de entrada o disminución de restricciones (Fig. 14.4). Si tenemos bastante claro lo que queremos desde el principio no sería mal sistema acotar el problema de entrada acudiendo a la opción *área de trabajo* para posteriormente pasar a estudios puntuales dentro de ese rango. A modo de resumen podemos decir que el segundo sistema es más estático y en cambio el primero es más interactivo al conocer en que puntos se producen las desviaciones y así poder corregirlas. Son métodos perfectamente complementarios.

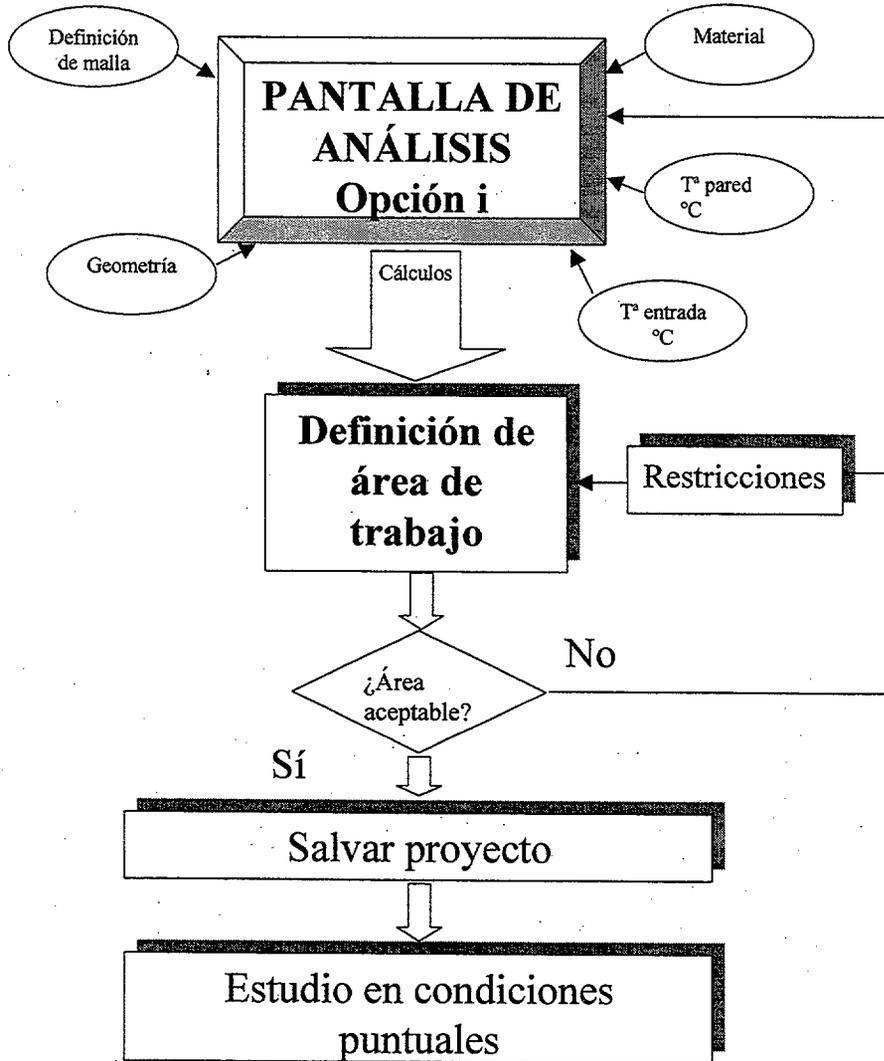


Fig.14.4.- Proceso de análisis de áreas de trabajo posibles

14.3.- Interactividad con otros programas de apoyo.-

Hoy en día la filosofía que se impone a nivel de aplicaciones informáticas es la de la intercambiabilidad con otros programas.

La interactividad la entendemos desde dos concepciones:

- a) Uso simultaneo de programas, compartiendo los recursos de hardware.
- b) Intercambio de ficheros y dinámico de datos.

DIEPLAST se ha pensado para trabajar en un entorno muy flexible que permite tener abiertos diferentes programas al mismo tiempo, con la posibilidad de transvase de información gráfica y textual de un programa a otro. No vamos a entrar ahora en las ventajas de utilizar entorno Windows ya que de todos es conocido y sin duda marca una tendencia clara.

Independientemente del hecho anterior DIEPLAST dispone la posibilidad de intercambiar ficheros, o en otras palabras, información con diferentes programas. La idea consiste en convertir a DIEPLAST en una herramienta que se complemente con otras y así aumentar la potencialidad del mismo. Resumimos las salidas o entradas más relevantes.

- Creación de ficheros ASCII de resultados numéricos que pueden ser leídos por diferentes aplicaciones de tratamiento de datos (Mathcad, matlab, Mathematica, Excel, etc).
- Exportación e importación de ficheros de base de datos de materiales, compatibles con ACCESS.

- Exportación de ficheros DXF de formato gráfico standard, importable por cualquier paquete de diseño gráfico de los que existen en el mercado (AUTOCAD, MICROSTATION, ICEM, IDEAS, etc).

- La creación de ficheros DXF es una herramienta muy útil ya que nosotros creamos tan solo la geometría del canal. Esta geometría importada por programas standard y posteriormente desarrollada se transforma en detalles constructivos del cabezal que van a permitir su fabricación.

BLOQUE IV

EJEMPLO DE APLICACIÓN

INDUSTRIAL

15.- EJEMPLO DE APLICACIÓN INDUSTRIAL CON EL PROGRAMA “DIEPLAST”. CABEZAL PARA EXTRUSIÓN DE TUBOS DE PVC.-

Como ejemplo de aplicación se ha seleccionado un caso claramente industrial dado que el mayor interés del trabajo realizado se va a centrar en su aplicación directa en la industria de la extrusión. Ya en apartados anteriores se comprobó el nivel de fiabilidad de DIEPLAST en relación a otros programas o resultados experimentales. Evidentemente las extrusoras experimentales no trabajan con grandes producciones ni están sometidas a los requerimientos de éstas. Por lo tanto como complemento al estudio realizado y sin ningún tipo de limitación se decidió efectuar un análisis de lo que realmente pasa en una extrusora de producción en en las condiciones habituales de producción. No son las extrusoras industriales máquinas preparadas para ensayos con lo cual la instrumentación de medida que disponen por defecto no es muy completa. Sin embargo agradecemos a la empresa PLASTICAN S.A. su colaboración para efectuar las pruebas, incluso adquiriendo una instrumentación no disponible de un interesante nivel de precisión. Nuestro agradecimiento es aún mayor no solo por la atención prestada sino también por el trastorno que este tipo de estudios supone para la producción (de tres turnos diarios) ya que hubo que modificar ésta para poder medir en diferentes supuestos como veremos en los siguientes apartados. PLASTICAN S:A es una empresa ubicada en la isla de Gran Canaria, del grupo URALITA y certificada por AENOR.

El producto fabricado consiste en tubos de PVC utilizados como elemento de uso sanitario o para gran presión. Según se trate de sanitario o presión el tipo de mezcla es diferente.

En principio se plantea el presente estudio desde un punto de vista del análisis de un cabezal ya fabricado, sin embargo, mostraremos variantes del mismo que han sido efectuados por la propia empresa y propuestas que realiza el autor del estudio.

El primer punto que abordaremos es la caracterización reológica del material a utilizar. Se trata de PVC en polvo mezclado con diferentes aditivos según proporciones

definidas por PLASTICAN. Por razones de discreción de la empresa no entraremos a describir esta composición. Precisamente por dicha particularidad en la composición se decidió efectuar un estudio de diferentes muestras en un reómetro para conocer o al menos estimar su curva de viscosidad. El siguiente paso será describir la extrusora, medios de medida utilizados y cabezales que se han probado. A continuación efectuaremos una simulación y análisis en DIEPLAST comparando con las medidas en la extrusora. Por último entraremos en un proceso de comparación con otros cabezales similares y propuesta de alternativas de mejora.

Por último queremos aclarar que las pruebas realizadas no atienden a un procedimiento excesivamente riguroso en cuanto al tratamiento estadístico de datos dado que el objeto no es *validar* un modelo sino mostrar un ejemplo de aplicación industrial con todas las reservas que ello significa.

15.1.- Materia prima utilizada. Análisis reológico.-

Las muestras analizadas son de dos tipos. La primera es PVC con aditivos de los utilizados por PLASTICAN para tuberías de presión y la segunda para sanitaria. Las llamaremos por lo tanto muestra de *presión* y muestra *sanitaria*.

El reómetro empleado para realizar los ensayos es uno del tipo capilar, de piston, modelo Gottfert-1500 (Fig. 15.1). La medida que se toma en este reómetro es fuerza en newton para cada velocidad de bajada del piston. Las características principales son:

- Diámetro del émbolo: 12 mm
- Diámetro del capilar: 1 mm
- Longitud del capilar : 20 mm

En los ensayos y análisis de los resultados nos hemos encontrado con los siguientes inconvenientes:

- El reómetro capilar no es el mejor sistema para tomar medidas en muestras de polímeros en polvo, siendo más recomendable un reómetro de husillo.
- A no tomarse la caída de presión al principio y fin del capilar (dándonos el valor diferencial) sino que la medición es de fuerza (que se transforma en presión) antes del capilar nos obliga a efectuar la corrección de Bagley (efecto de la deformación a la entrada y salida del capilar sobre la presión).
- La falta de utillaje complementario en el reómetro disponible impidió efectuar la corrección de Bagley [15,48] mediante capilares de igual diámetro pero diferente longitud.

Todos estos inconvenientes se salvaron de diferente forma. Se tenían dudas sobre el comportamiento de la muestra en este tipo de reómetros, sin embargo, pudimos comprobar que aunque algunas mediciones no salieron acordes a valores lógicos si

obtuvimos un número suficiente como para poder obtener las curvas deseadas; tengamos en cuenta que para cada muestra se realizaron dos ensayos para tres temperaturas diferentes y cada ensayo tenía un máximo de 10 mediciones. O sea, un total de 60 medidas que son un número bastante alto para poder desechar las no fiables.

Para el problema de la corrección de Bagley se ha ideado un método tal vez no demasiado habitual pero pensamos que es lo suficientemente fiable para los objetivos que se pretenden. Dicho método lo explicaremos a continuación conjuntamente con el proceso global que se ha seguido.

Proceso seguido hasta llegar a a las curvas de viscosidad de las muestras

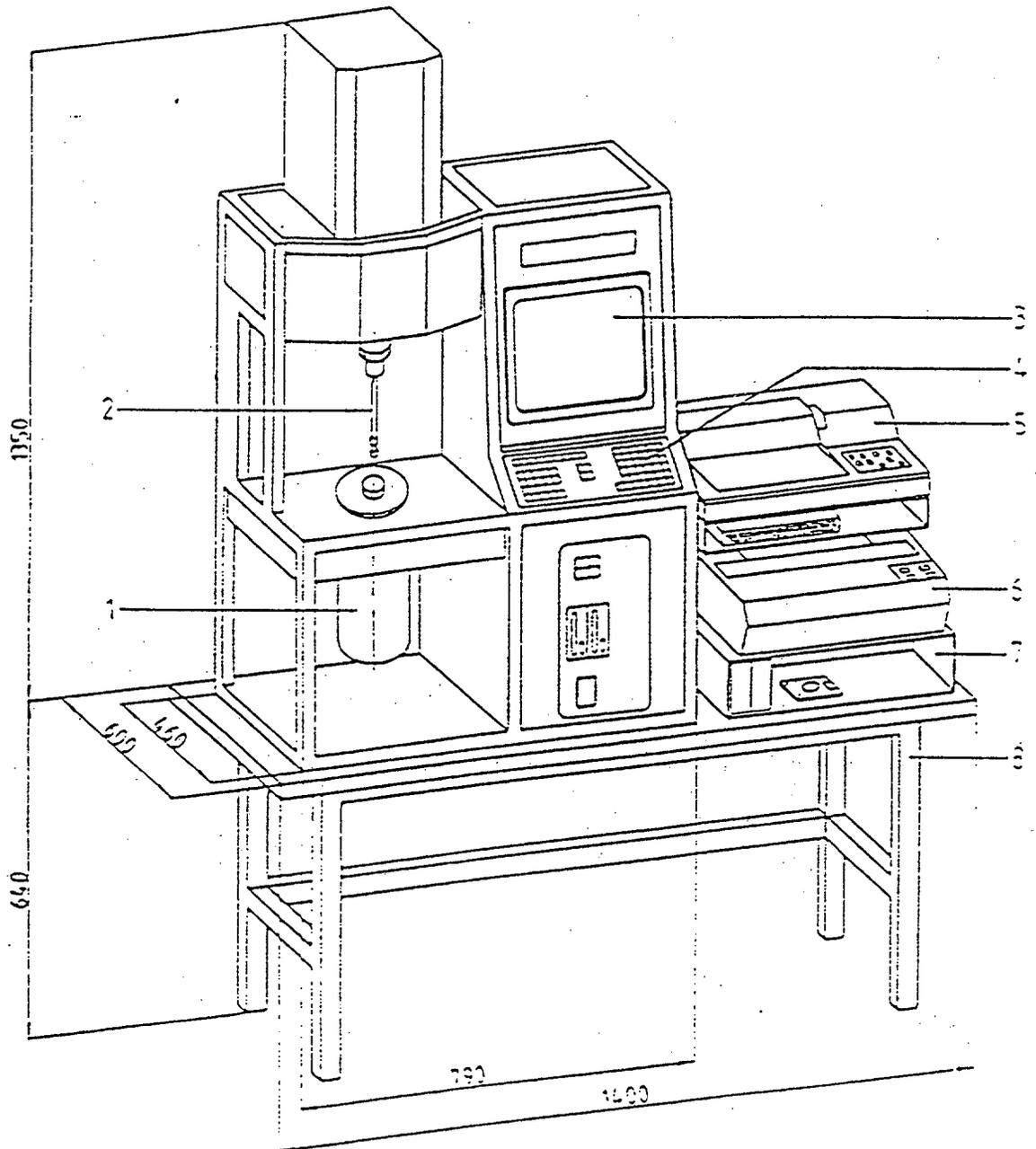
Primera parte: Estimación de la presión debida a la deformación a la entrada y a la salida (método que sustituye a la corrección de Bagley):

- 1.- Ensayo de muestra de PVC en granza a 190 °C y 180°C (IR 705 de Solvay) con el reómetro Gottfert- 1500. Obtención de tabla de presiones.
- 2.- A partir de curvas de viscosidad suministradas por Solvay simulación en DIEPLAST de un reómetro virtual y obtención de caídas de presión a 190°C y 180°C.
- 3.- Cálculo del diferencial de presión (a 180°C y 190 °C) para cada caudal o velocidad de presión entre lo obtenido en DIEPLAST y lo obtenido en el reómetro. Estas presiones serán las que extrapolaremos y utilizaremos como corrección de las muestras de sanitario y presión.

Segunda parte: Obtención de curvas de viscosidad para las muestras de presión y sanitario.

- 1.- Ensayos en reómetro para diferentes temperaturas de las muestras de presión y sanitario.
- 2.- Corrección de los valores de presión obtenidos para cada velocidad del émbolo con los diferenciales obtenidos en la primera parte.
- 3.- Corrección de Rabinowitsch [49] y obtención de curva de viscosidad.

4.- Ajuste de la curva con el modelo de Carreau.



© Del documento, los autores. Digitalización realizada por ULPGC. Biblioteca Universitaria, 2007

Fig. 15.1. Reómetro Gottfert-1500

Primera parte. Estimación del incremento de presión debida a la deformación a la entrada y salida del capilar

Como ya hemos comentado existía una dificultad de medios para efectuar la corrección de Bagley como se debería hacer; ésto es mediante el uso de capilares de igual diámetro y diferente longitud. Calculando las presiones totales para cada longitud podemos sacar una extrapolación de tal manera que si suponemos que el efecto de deformación es independiente de la longitud, para un caudal igual a cero simplemente alargando la recta en un gráfico presión-caudal obtenemos la presión debida a dicho efecto.

Desechada esta opción se pensó en un método para salvar este obstáculo. Se trata de partir de una muestra también de PVC, en forma de granza cuya curva de viscosidad aparente si se conoce ya que ha sido facilitada por Solvay. Si somos capaces de averiguar cual es el incremento de presión debido al efecto de deformación lo podemos extrapolar a las muestras que nos interesan en la hipótesis de que el error cometido no va a ser demasiado representativo. ¿Como averiguamos la corrección de Bagley de este PVC de Solvay (IR 705) si seguimos con un solo capilar?. La respuesta consiste en utilizar el programa DIEPLAST como un *reómetro virtual* donde introduciendo la curva de viscosidad real obtenemos los valores de caída de presión en el capilar (DIEPLAST en sus cálculos no tiene en cuenta el efecto de deformación a la entrada y salida). Conocemos por lo tanto la caída de presión originada exclusivamente por el flujo a través del capilar. Dicha caída de presión la compararemos con la que resulta del ensayo con la muestra del IR 705 en el reómetro Gottfert-1500. Evidentemente se trata de dos presiones de diferente naturaleza ya que la del reómetro incluye el efecto entrada-salida. Por lo tanto hallando la diferencia de ambas conocemos las correcciones de presión a cada medición o valor de caudal.

Veamos el proceso paso a paso

Obtención de la curva de viscosidad real con ajuste de Carreau desde la curva de viscosidad aparente suministrada por Solvay (PVC IR 705)

Tomando como datos de partida los de viscosidad aparente de Solvay obtenemos la viscosidad real una vez hecha la corrección de Rabinowitsch (15.1)

$$\gamma_{c_i} = \frac{(\gamma a)_i}{4} \cdot \left[3 + \frac{\log[(\gamma a)_i] - \log[(\gamma a)_{i-1}]}{\log[(\tau)_i] - \log[(\tau)_{i-1}]} \right] \quad (15.1)$$

Realizada la corrección tenemos los siguientes puntos de velocidad de cizalla y viscosidad para una temperatura de 190 °C:

| γ_{c_i} | η_{c_i} |
|--------------------|--------------------|
| 53.757 | $4.217 \cdot 10^3$ |
| 132.724 | $2.54 \cdot 10^3$ |
| 568.614 | 993.29 |
| $2.38 \cdot 10^3$ | 273.06 |
| $9.676 \cdot 10^3$ | 82.675 |
| s-1 | Pa x s |

A partir de estos valores y ajustando la curva con el modelo de Carreau calculamos los parámetros A, B, C para una temperatura de 190 °C

$$A = 9.47 \times 10^3 \text{ Pa x s}$$

$$B = 0.037 \text{ s}$$

$$C = 0.734$$

El resto de temperaturas se determina mediante el método WLF ()

En la Fig. 15.2 podemos observar la evolución de la curva de viscosidad aparente (η_a), la de viscosidad corregida (η_c) y la de viscosidad mediante ajuste de

Carreau (η_{ss}). El ajuste de Carreau es aceptable dentro del rango de velocidades de cizalla de trabajo en el reómetro ($\dot{\gamma} < 1500 \text{ s}^{-1}$).

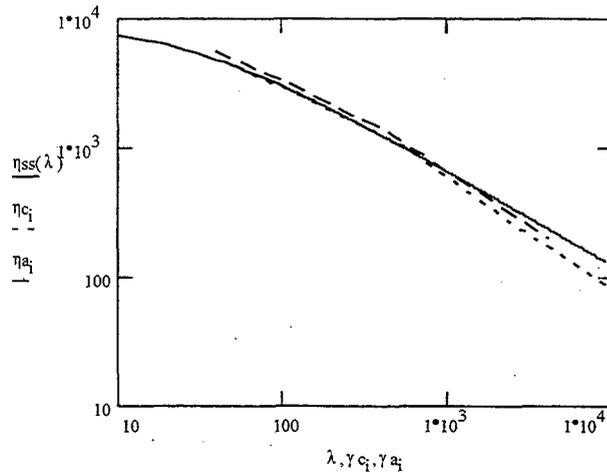


Fig. 15.2.- Curvas de viscosidad a 190 °C PVC IR 705

Valores de fuerza resultantes de la prueba en el reómetro con la muestra de PVC IR 705 (Solvay)

En el reómetro Gottfert se efectuaron 6 ensayos a 3 temperaturas diferentes (180°C, 190°C y 200°C), tomándose para cada ensayo un máximo de 10 mediciones. En algún caso hubo que desechar los valores extremos, bien por falta de compactación inicial o por no tomarse datos para valores altos de velocidad de bajada del émbolo. Los resultados que se han plasmado en las tablas 15.1 y 15.2 corresponden a 190°C y 180°C respectivamente, donde aparecen las velocidades de bajada del pistón, las fuerzas medidas en newton y los mm³/sg.

| Velocidad del cilindro (mm/s) | Caudal (mm³/s) | Fuerza medida (N) |
|--|----------------------------------|--------------------------|
| 0.02 | 2.262 | 2136.5 |
| 0.05 | 5.655 | 3133.1 |
| 0.1 | 11.31 | 3983.7 |
| 0.2 | 22.619 | 4950.5 |
| 0.5 | 56.549 | 6119.5 |
| 1 | 113.097 | 6937.5 |
| 1.5 | 169.646 | 7303.1 |
| 2 | 226.195 | 7499.9 |
| 2.5 | 282.743 | 7636.2 |

Tabla 15.1.- Resultados del reómetro a 190°C. IR 705.

| Velocidad del cilindro (mm/s) | Caudal (mm³/s) | Fuerza medida (N) |
|--|----------------------------------|--------------------------|
| 0.02 | 2.262 | 2779.1 |
| 0.05 | 5.655 | 3705.6 |
| 0.1 | 11.31 | 4903.1 |
| 0.2 | 22.619 | 6363 |
| 0.5 | 56.549 | 7417 |
| 1 | 113.097 | 8216.8 |
| 1.5 | 169.646 | 8552.1 |
| 2 | 226.195 | 8732.2 |

Tabla 15.2.- Resultados del reómetro a 180°C. IR 705.

Corrección de presión debida a la deformación entrada-salida en IR 705

Como ya dijimos anteriormente se utilizó DIEPLAST como reómetro virtual del que se obtuvieron caídas de presión para diferentes caudales. Estos valores se han comparado con los de presión calculados con el reómetro Gottfert (fuerza dividido por área) y se ha determinado su diferencia. Dado que la curva de viscosidad introducida en DIEPLAST fué ajustada mediante Carreau se han eliminado los valores extremos que corresponden a altas velocidades de cizalla ya que en este último tramo el ajuste es peor. De este modo los valores de los diferenciales de presión (corrección de Bagley) son los indicados en la tabla 15.3 para 190°C y 180°C (la elección de estas dos temperaturas obedece a que son las elegidas en las muestras de presión y sanitario).

| Velocidad del cilindro (mm/s) | Diferencial de presión (bar) 180°C | Diferencial de presión (bar) 190°C |
|--|---|---|
| 0.02 | 44.938 | 67.868 |
| 0.05 | 54.916 | 72.147 |
| 0.1 | 52.955 | 73.246 |
| 0.2 | 58.601 | 80.8 |
| 0.5 | 60.714 | 75.123 |
| 1 | 41.524 | 56.98 |
| 1.5 | 15.344 | 31.176 |

Tabla 15.3.- Correcciones de presión.

Segunda parte. Obtención de curvas de viscosidad para las muestras de presión y sanitario.

Resultados del ensayo en el reómetro Gottfert

Para cada muestra se efectuaron 6 ensayos a tres temperaturas (170°C, 180°C y 190°C) con un máximo de 10 mediciones para cada una. Para el estudio se ha seleccionado el ensayo a 190°C para *presión* y 180°C para *sanitario*. Ambos los vemos en la tabla 15.4.

| Velocidad del cilindro (mm/s) | Fuerza medida (N) 190 °C | Fuerza medida (N) 180°C |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0.01 | 1357.5 | 1508.8 |
| 0.02 | 1592.2 | 1721.1 |
| 0.05 | 2227.6 | 2365.7 |
| 0.1 | 2584.8 | 2897.2 |
| 0.2 | 3186.3 | 4248.4 |
| 0.5 | 4309.4 | 6503.9 |
| 1 | 6274 | 7707.1 |
| 1.5 | 7015.5 | 8060.9 |
| 2 | 7037.1 | 8156.7 |

Tabla 15.4.- Mediciones efectuadas en reómetro para muestras de PVC presión y sanitario

Curvas de viscosidad de las muestras de PVC presión y sanitario

Las presiones calculadas fueron corregidas con los correctores de la tabla 15.3 para ambas temperaturas. Con las presiones resultantes y mediante las expresiones habituales para flujo newtoniano obtenemos la viscosidad que luego debemos corregir mediante Rabinowitsch (15.1). Terminado todo este proceso llegamos a los siguientes puntos de la curva de viscosidad.

PVC presión (190°C)

PVC sanitario (180°C)

γ (s-1) η (pa x s)

γ (s-1) η (pa x s)

33.9 4603

39.8 4851

88.9 2184

79.4 3199

163.9 1532

131.3 3019

372.9 1025

352.3 1825

637 976.7

889 900

1168 630.7

1667 523

Como comparación en la figura 15.3 observamos la evolución de las curvas de viscosidad , a 190°C, del PVC IR 705 de Solvay, de la muestra de PVC *presión* y de la muestra de PVC *sanitario*.

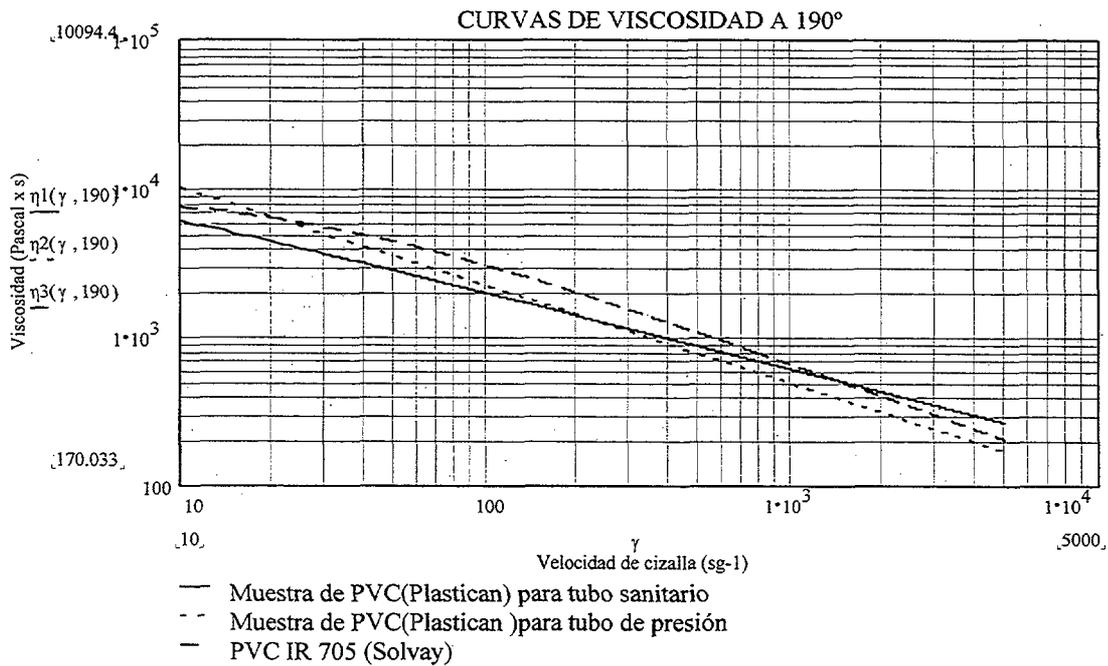


Fig. 15.3.- Comparación de curvas de viscosidad

En las figuras 15.4 y 15.5 se muestran las curvas de viscosidad de las muestras de PVC presión y PVC sanitario a tres temperaturas, 180 °C, 190°C y 200°C.

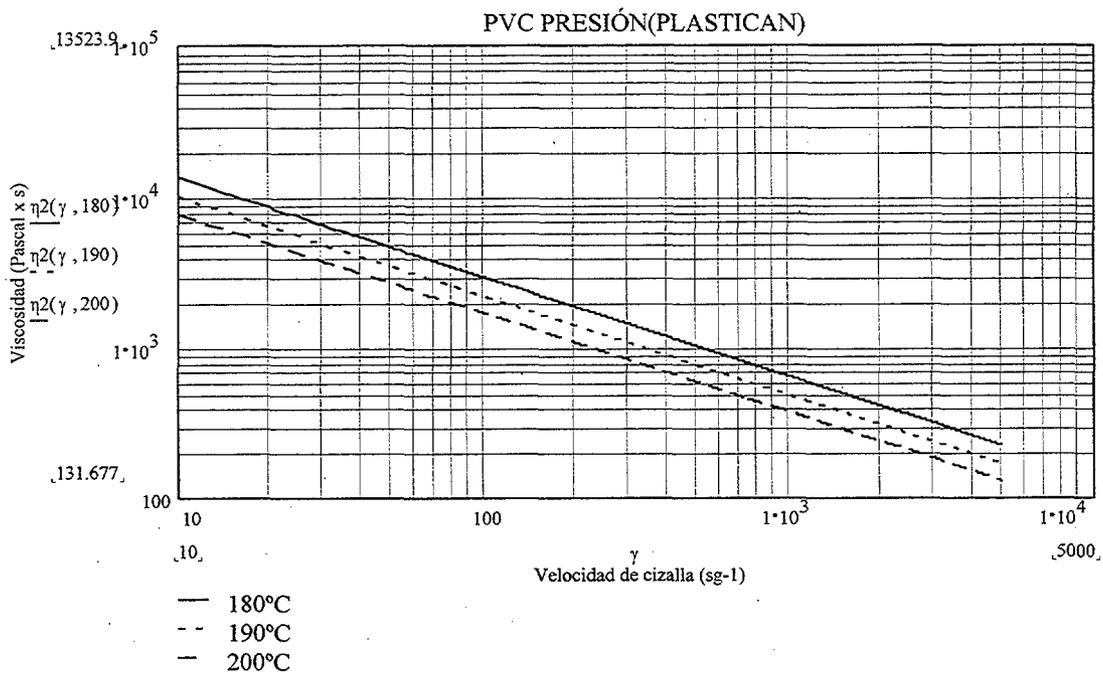


Fig. 15.4.- Curvas de viscosidad PVC presión

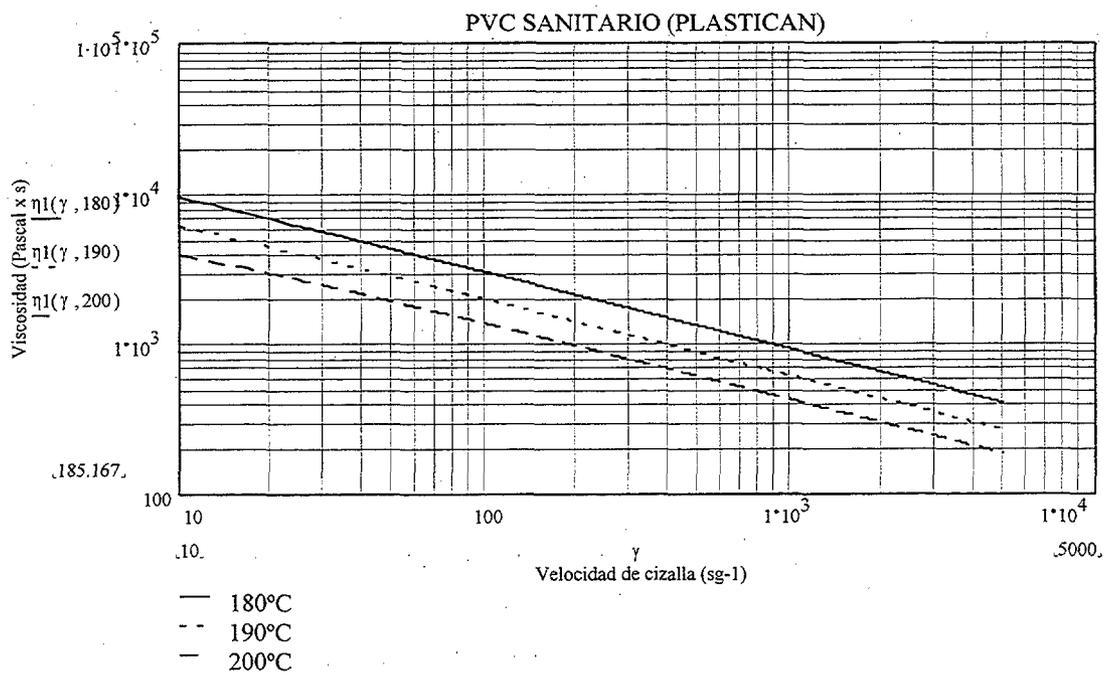


Fig. 15.5.- Curvas de viscosidad PVC sanitario

15.2.- Descripción general de la extrusora y cabezales a estudiar.-

La instalación utilizada para las pruebas es la típica línea de extrusión de tubos. En nuestro caso es una línea formada por las siguientes partes principales:

- Sistema de alimentación.
- Conjunto extrusora-cabezal.
- Sistema de refrigeración y calibrado por vacío.
- Sistema de refrigeración posterior.
- Sistema de arrastre.
- Sistema de corte simultaneo.
- Sistema de calentamiento y ensanchamiento de boca de tubo.

La extrusora es de doble husillo, del fabricante Cincinati Milacron, modelo CM 55SC (figura 15.6), con unas revoluciones máximas del husillo de 36 RPM.

Las medidas que se disponen en la máquina son las siguientes:

- 3 mediciones de temperatura a lo largo del husillo.
- 5 mediciones de temperatura en el cabezal (temperatura de hierro), zona 1, zona 2, zona 3, zona 4 (macho) y zona 5 (tobera).

Ademas y como elementos básicos de medida en nuestro trabajo tenemos una sonda de temperatura de *masa* a la entrada del cabezal tipo J y una sonda de presión superficial, también a la entrada del cabezal (modelo ISI 0101-1/2-7 OCB-6/18).

La lectura de temperatura de masa a la entrada del cabezal se efectúa en un lector Lexitron L3T, con resolución en décimas de grado centígrado. La lectura de presión en un lector Lexitron L3B (con resolución en décimas de bar).

Las medidas fundamentales a tomar en cada ensayo van a ser la de temperatura de masa y la de presión.

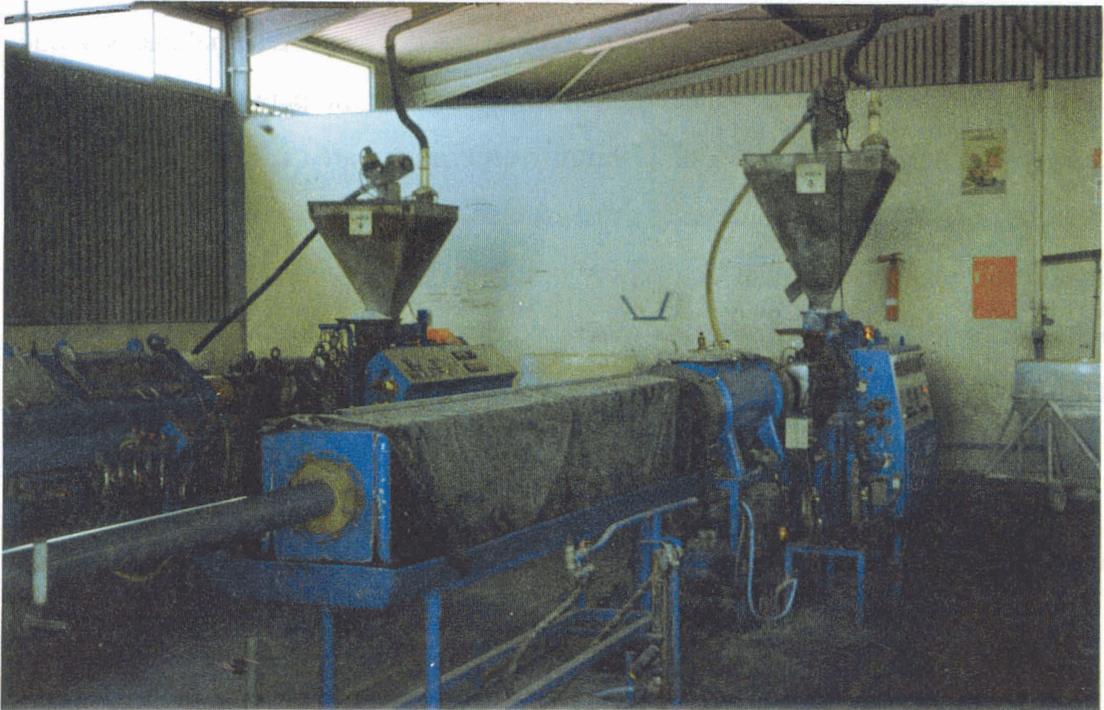


Fig. 15.6.- Extrusora Cincinati Milacron CM 55SC.

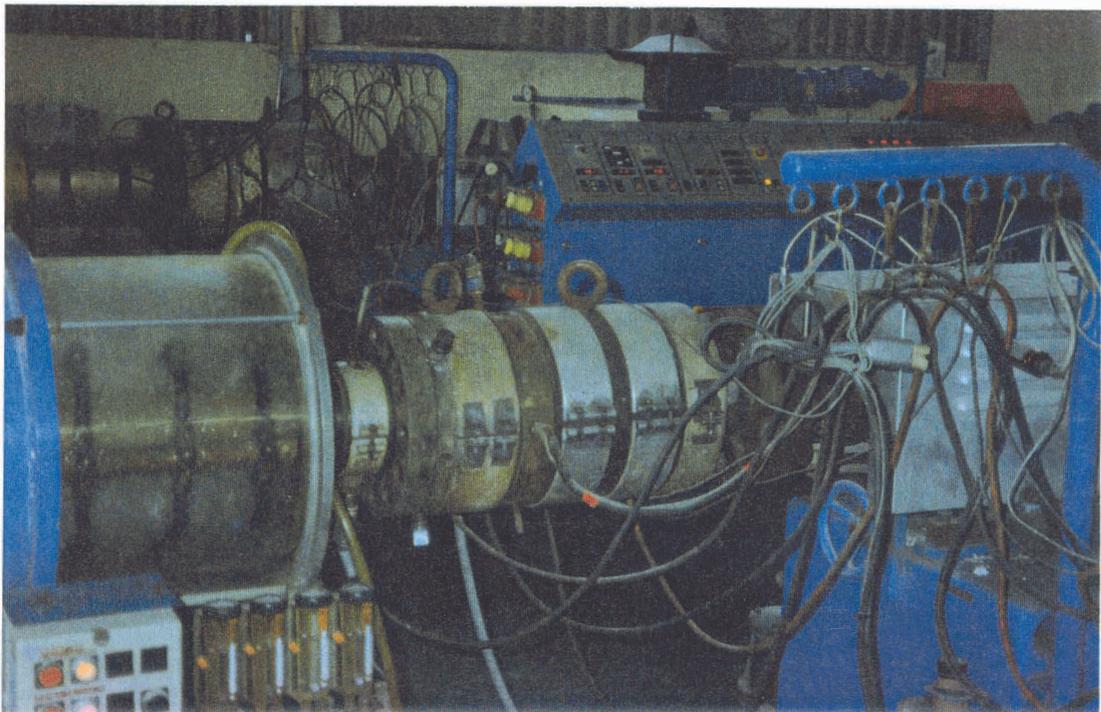


Fig. 15.7.- Cabezal R92

Cabezal R-92 sin modificar (Fig. 15.8)

El cabezal R-92 objeto de estudio es una de las dos variantes analizadas y que con el juego tobera (o hilera) -macho adecuado nos servirá para fabricar el *tubo sanitario* de PVC de diámetro exterior 110 mm y espesor de pared 2.2 mm. En este tipo de cabezales el fabricar un tubo de unas dimensiones a fabricar otro diferente dentro de la gama posible significa cambiar el macho y la tobera. Concretamente para el tubo que nos ocupa (110 x 2.2) se utilizará una tobera de diámetro 109.9 mm y un macho de diámetro 106.5 mm.

La denominación R-92 es propia del fabricante y hace mención a la familia que cubre toda la gama de diámetros y espesores posibles. La expresión *corto* se la hemos dado nosotros ya que la empresa usuaria del mismo realizó sobre éste una modificación importante y que llamaremos *R-92 largo*.

Este tipo de cabezales es del tipo torpeda y con soporte tipo *araña*. Las características principales son:

- * Se compone de un total de ocho elementos principales (Fig. 15.8).
- * El número de brazos del soporte para el caso que nos ocupa es de 6.
- * El centrado del macho con respecto a la tobera se produce mediante tornillos de ajuste.
- * Dispone de entradas de aire comprimido para soplado y calibrado del tubo si fuese necesario. En nuestro caso el calibrado posterior no va a ser por soplado sino por vacío.
- * Además del calefactado por resistencias eléctricas de las paredes exteriores se calefacta el macho interior (de forma indirecta).

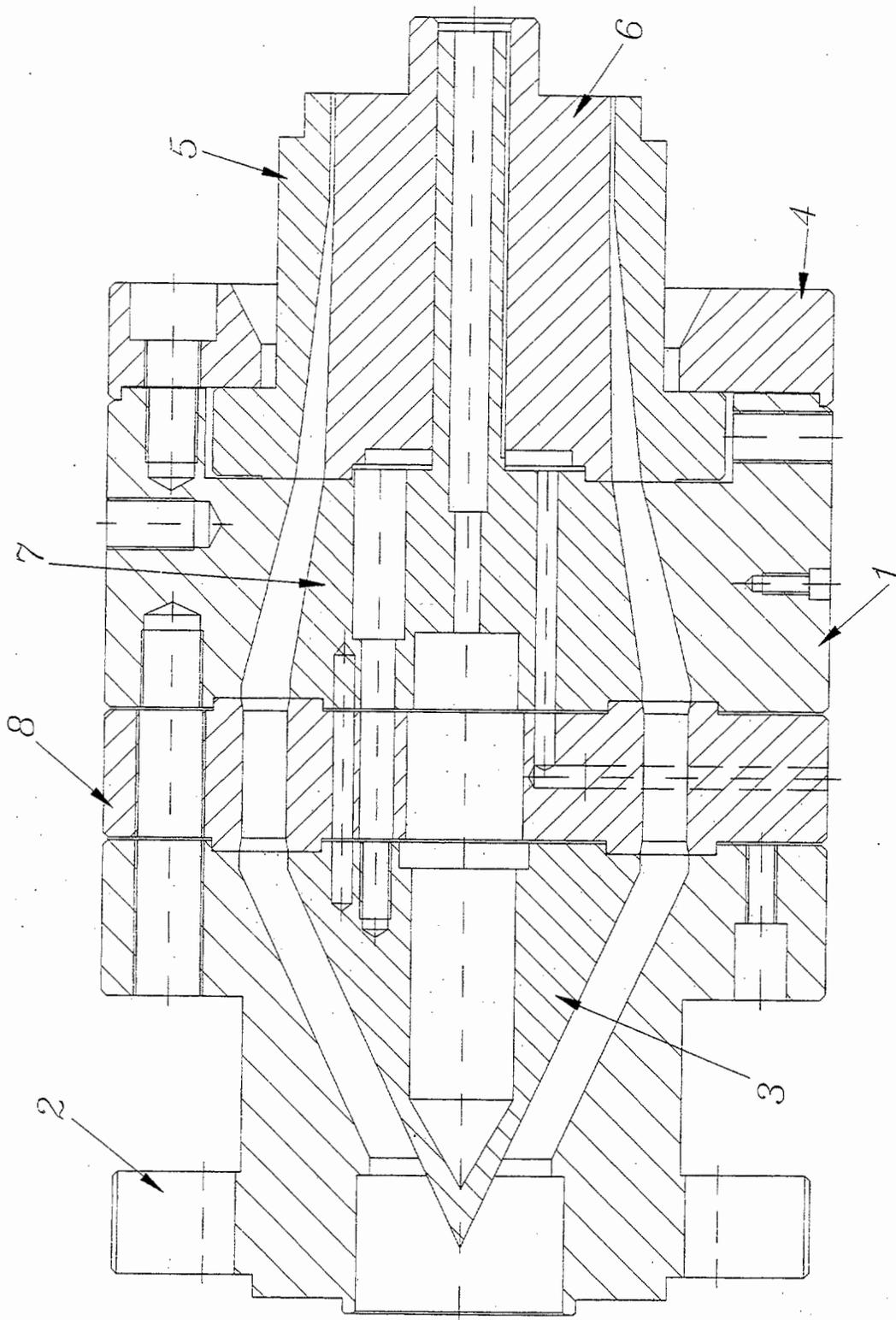


Fig.15.8.- Cabezal R-92 *sin modificar*.

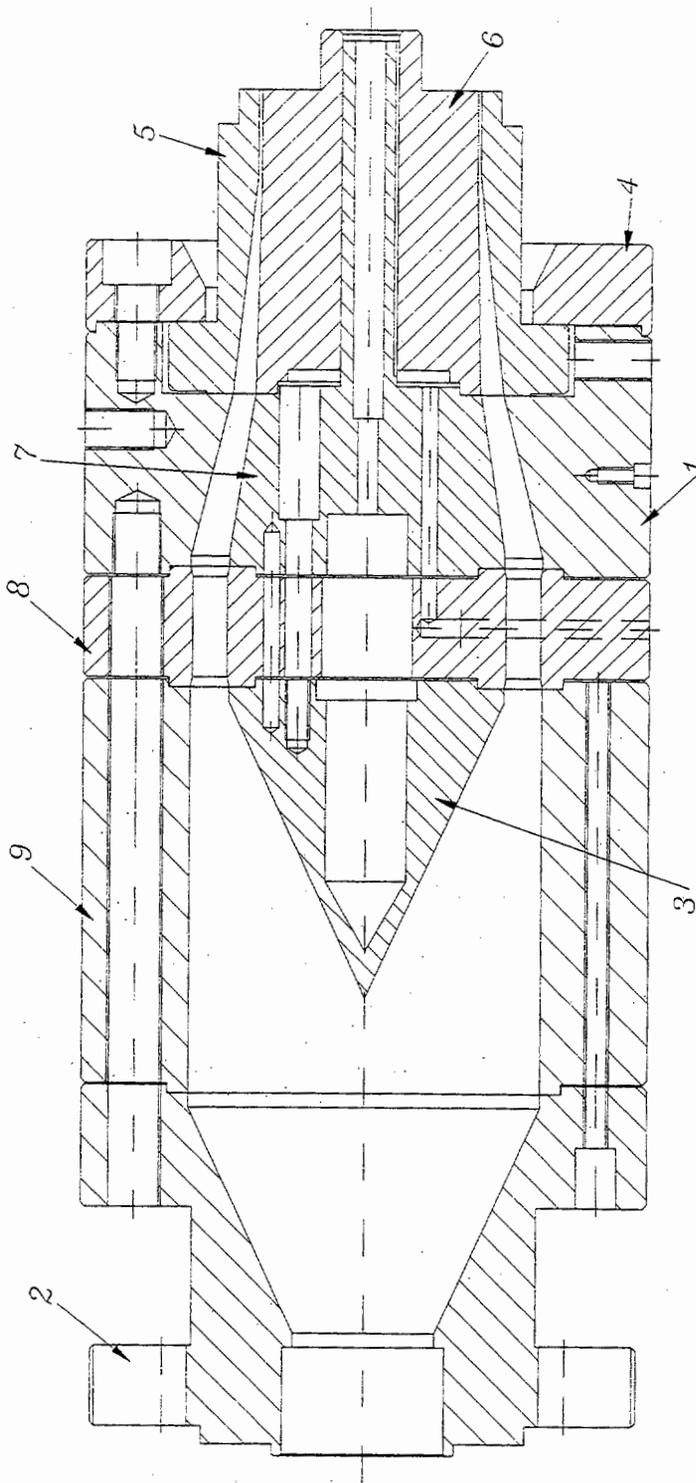


Fig. 15.9.- Cabezal R-92 *modificado*

Cabezal R-92 modificado (Fig. 15.9)

Es una variación sobre el original R-92 desarrollada por la empresa PLASTICAN con vistas a resolver determinados problemas de producción. El problema principal que tenían era el de una rugosidad superficial en el tubo a la salida del cabezal. De una manera intuitiva decidieron añadir un anillo más al cabezal (Fig. 15.9) con la intención de resolver el problema. El resto de las características son idénticas al R-92 ya que se han mantenido intactas.

Aprovecharemos esta doble modalidad del R-92 para sacar conclusiones sobre el cambio realizado.

15.3.- Análisis de resultados y comparación con medidas en extrusora.-

Consideraciones previas

Tal como se planteó en los fundamentos teóricos existen una serie de suposiciones e hipótesis cuando se realizan los cálculos utilizando DIEPLAST. No nos referiremos de nuevo a ellas pero sí mencionaremos un aspecto que ocurre realmente en el ejemplo probado. Ésto se refiere al hecho de que la temperatura en la pared exterior del canal no sea constante a lo largo del mismo. El exterior del cabezal dispone de una serie de resistencias que calientan zonas parciales. La extrusora dispone de una serie de equipos de medida de temperatura en diferentes zonas. No obstante la medida de temperatura no se mide justo en la pared que va a estar en contacto con el polímero (como era de esperar) sino a una altura que varía con la situación. Así por ejemplo en la zona 1 la sonda se encuentra a 45 mm de la superficie exterior del cabezal, en la zona 2 a 45 mm, etc. En cualquier caso marcan la evolución del calentamiento del cabezal a lo largo del mismo. En la prueba realizada las temperaturas medidas son las siguientes:

- * Zona 1 : 170 °C
- * Zona 2 : 180 °C
- * Zona 3 : 190 °C
- * Zona 4 (anterior al macho) : 195 °C
- * Zona 5 = 190 °C

A efectos de simplificar el problema y para poder adaptarlo a nuestro caso supondremos una temperatura constante en toda la pared e igual a 190°C. Tomamos esta temperatura al ser la que aparece en los tramos finales y que coinciden con las zonas de mayor influencia sobre el polímero al estrecharse la sección. Recordemos la condición de pared adiabática con lo cual no va a existir ningún tipo de transmisión de calor.

Se efectuaron tres pruebas a diferentes producciones y procurando mantener una temperatura de masa a la entrada aproximadamente constante. Para ello se realizó un cambio en las revoluciones por minuto de los husillos con vistas a variar la producción.

La dificultad estriba en que al bajar las revoluciones la fricción en el husillo disminuye y en consecuencia baja la temperatura del material, que llega al cabezal más frío. La solución fué modificar de manera coordinada las temperaturas de las paredes del cubo que envuelve el husillo aumentándo las de cada tramo en el caso de bajar las revoluciones. A partir de aquí hubo que esperar el tiempo necesario hasta que se estabilizace la temperatura a la entrada del cabezal alrededor de un valor predeterminado (190 °C).

Los kg/h se determinaron mediante un cronómetro y una balanza de precisión que permitieron calcular para cada tubo completo su tiempo de extrusión y su peso.

Resultados obtenidos en las pruebas

En la tabla 15.5 podemos observar para cada producción y revoluciones por minuto de los husillos cual es la temperatura de masa , lecturas de presiones de pico (máximas y mínimas) y presiones medias . El valor de presión media lo tomaremos como el más representativo. El cabezal corresponde al R92 modificado y el material al PVC sanitario.

| Extrusora | RPM | kg/h | Temperatura de masa (°C) | Presión de pico máxima (bar) | Presión de pico mínima (bar) | Presión media (bar) |
|-----------|-----|-------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| CM 55SC | | | | | | |
| Prueba 1 | 36 | 229.3 | 189.5 | 258 | 248 | 250 |
| Prueba 2 | 26 | 167.4 | 189 | 240 | 216 | 224 |
| Prueba 3 | 16 | 98.2 | 190 | 188 | 170 | 175 |

Tabla 15.5.- Resultados de pruebas para el cabezal R92 *modificado* (para tubo 110 x 2.2)

A efectos de considerar la temperatura de masa y para poder obtener la curva característica del cabezal vamos a tomar como valor de referencia para la misma 190°C. La prueba 1 corresponde a las máximas revoluciones de la máquina.

Resultados obtenidos en DIEPLAST

Con las consideraciones anteriores, la geometría del R92 largo (Fig. 15.10), el material PVC sanitario y los datos de trabajo se analizó el cabezal para cada una de las condiciones en DIEPLAST. El método utilizado es el numérico para lo cual se definió una malla con 10 capas y una separación entre secciones de 2 mm. Dentro del método numérico se utilizaron dos hipótesis de trabajo, condiciones isotérmicas (a 190°C) y condiciones no isotérmicas (temperatura variable en el flujo). Un resumen de resultados para poder comparar con la tabla 15.5 los vemos en la tabla 15.6.

| | RPM | kg/h | Temperatura de masa (°C) | Temperatura de pared (°C) | Presión (bar) (isotérmica) | Presión (bar) (no isotérmica) |
|----------|-----|-------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Prueba 1 | 36 | 229.3 | 189.5 | 190 | 264 | 235.5 |
| Prueba 2 | 26 | 167.4 | 189 | 190 | 225.3 | 207 |
| Prueba 3 | 16 | 98.2 | 190 | 190 | 171.9 | 161.1 |

Tabla 15.6.- Resultados del análisis del cabezal R92 *modificado* con DIEPLAST

En la figura 15.10 aparecen en un gráfico la comparación de las curvas características del cabezal que se obtienen de la extrusora y las que se obtienen en DIEPLAST en condiciones isotérmicas y no isotérmicas.

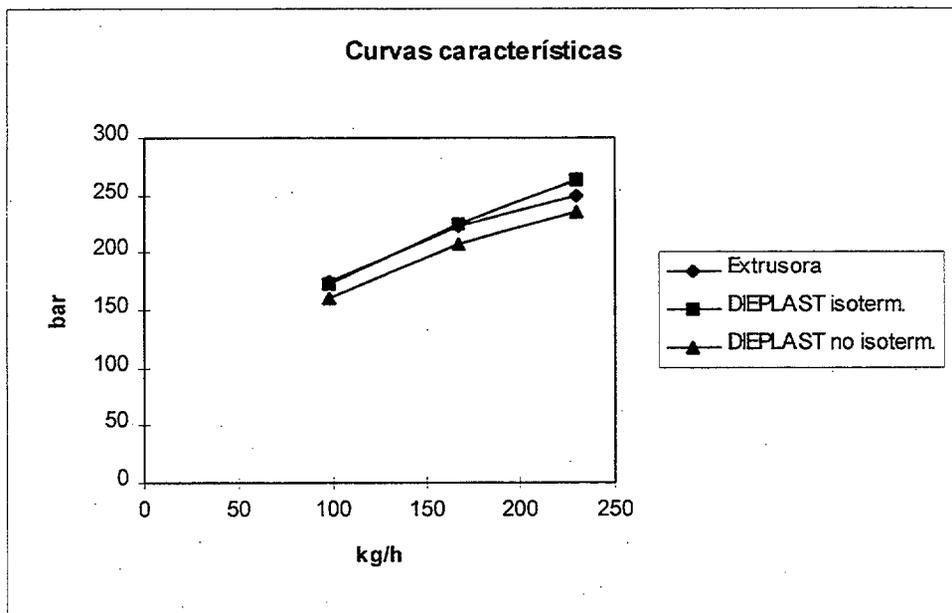


Fig.15.10.- Curvas características a 190 °C. R92 *modificado*.

Como primera impresión podemos decir que las medidas tomadas en la extrusora se encuentran entre los resultados que proporciona DIEPLAST para condiciones isotérmicas y no isotérmicas, con unos valores ciertamente interesantes ya que el error que ocurre para el modelo isotérmico oscila entre un 0.6 % y un 5%; para el modelo no isotérmico oscila entre un 5.8% y un 8%. Teniendo en cuenta los condicionantes propios de una extrusora industrial podemos considerar la prueba como muy satisfactoria. No obstante conviene comentar algunos aspectos que han influido en los cálculos. El primero de ellos hace referencia a que el mandril interior está atemperado, midiéndose una temperatura en la zona 4 (anterior al tramo del macho de salida) de 195 °C. Ésto ha influido en la obtención de una presión en general mayor para condiciones isotérmicas ya que sin en la zona de la pared interior en realidad hay más de 190°C la masa estará con mayor fluidez y por lo tanto la presión disminuirá. En DIEPLAST no se ha incluido de momento la opción para partir de una temperatura dada del macho interior. El segundo se refiere a que en realidad la temperatura a lo largo de la pared externa del cabezal no es exactamente constante sino que varía entre 170°C a la entrada y 190 °C a la salida (zona de tobera). Con respecto a ésto hay que decir que las temperaturas mencionadas son medidas en el propio *hierro* a una distancia de pared en contacto con el fluido. En cualquier caso dado que la temperatura de masa a la entrada es de 190°C y

a que en los tramos finales es también de 190°C es justamente esta temperatura la que más influencia tendrá en el flujo (el canal a la salida es el más estrecho y hay mayor contacto con pared). Pudiera esta circunstancia haber influido en que los valores de presión no isotérmicos hayan resultado inferiores a los medidos en la extrusora, sin embargo no creemos que sea un factor determinante.

Independientemente de las causas que hayan provocado el error cometido (inherentes al método de cálculo o al propio proceso) la mayor conclusión es el interés que tiene DIEPLAST para el uso que se pretende de él, que es su aplicación directa a los procesos industriales de extrusión.

El resto de los parámetros que proporciona DIEPLAST los mostramos a continuación para la extrusora trabajando a sus máximas revoluciones.

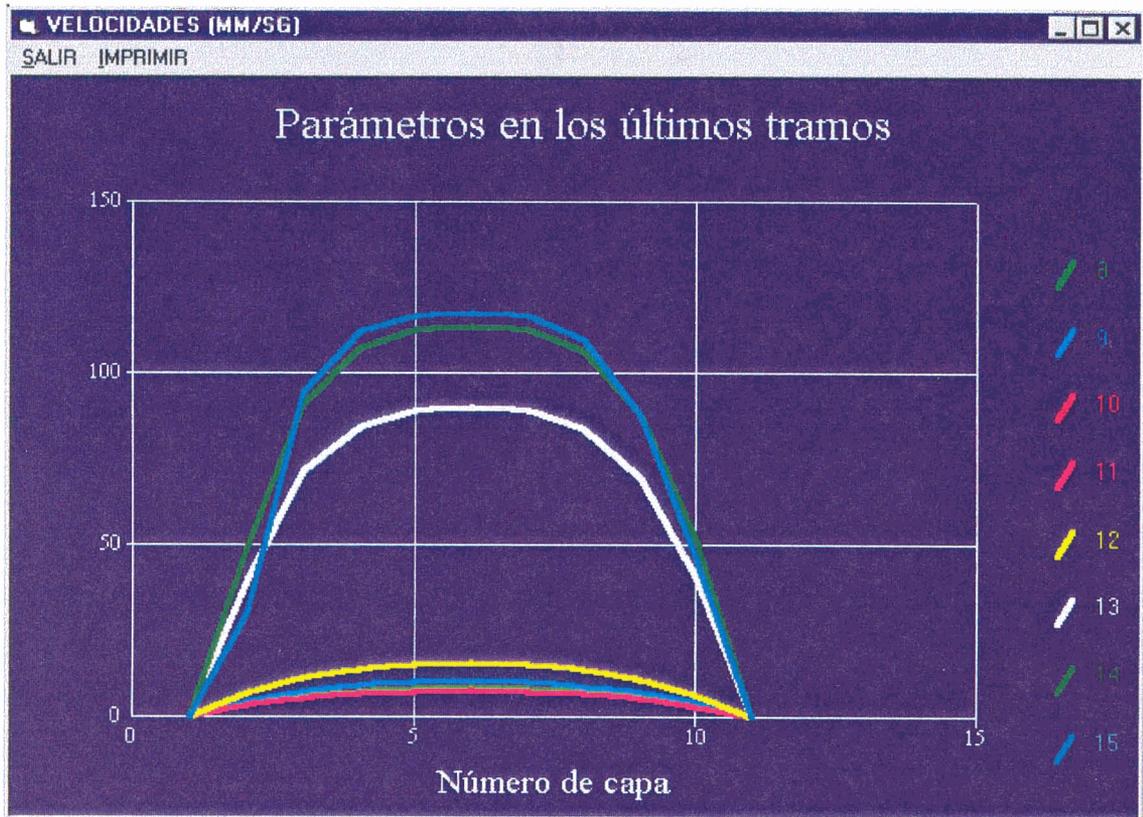


Fig.15.11.- Perfil de velocidades (mm/s) en los últimos tramos. R92 modificado.

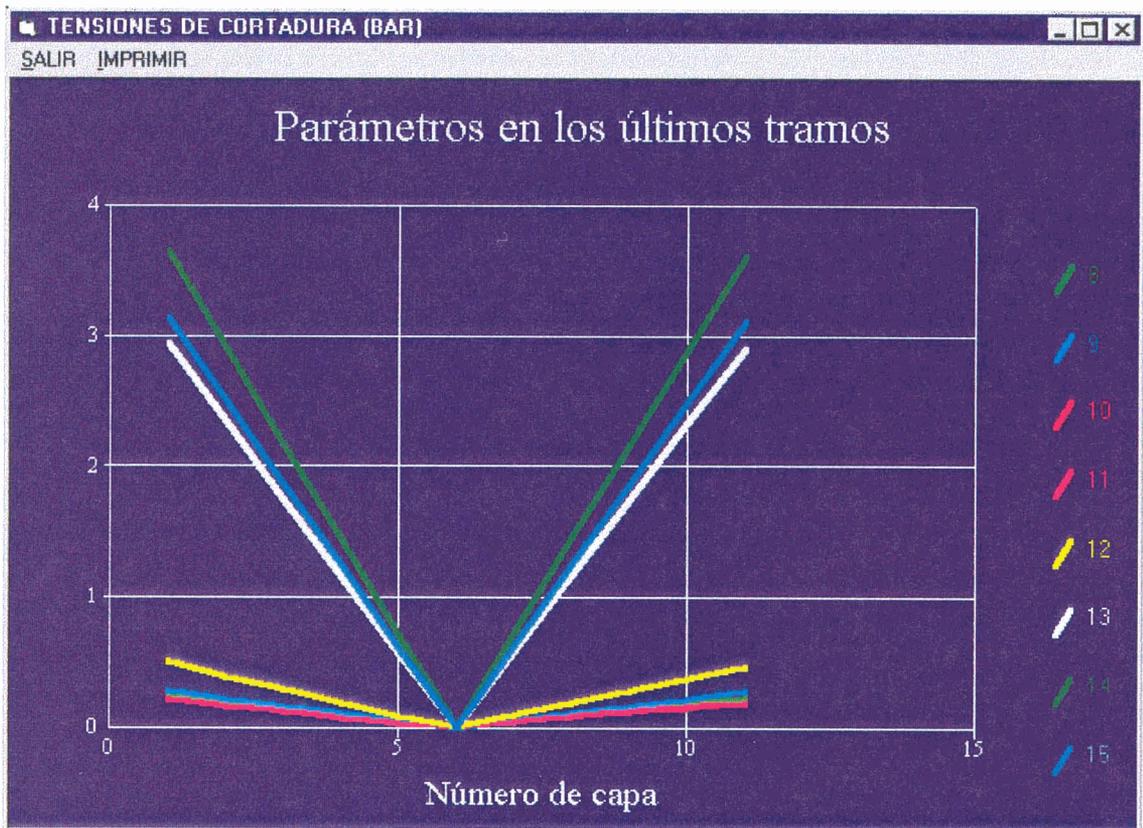


Fig.15.12.- Perfil de tensiones (bar) en los últimos tramos. R92 modificado.

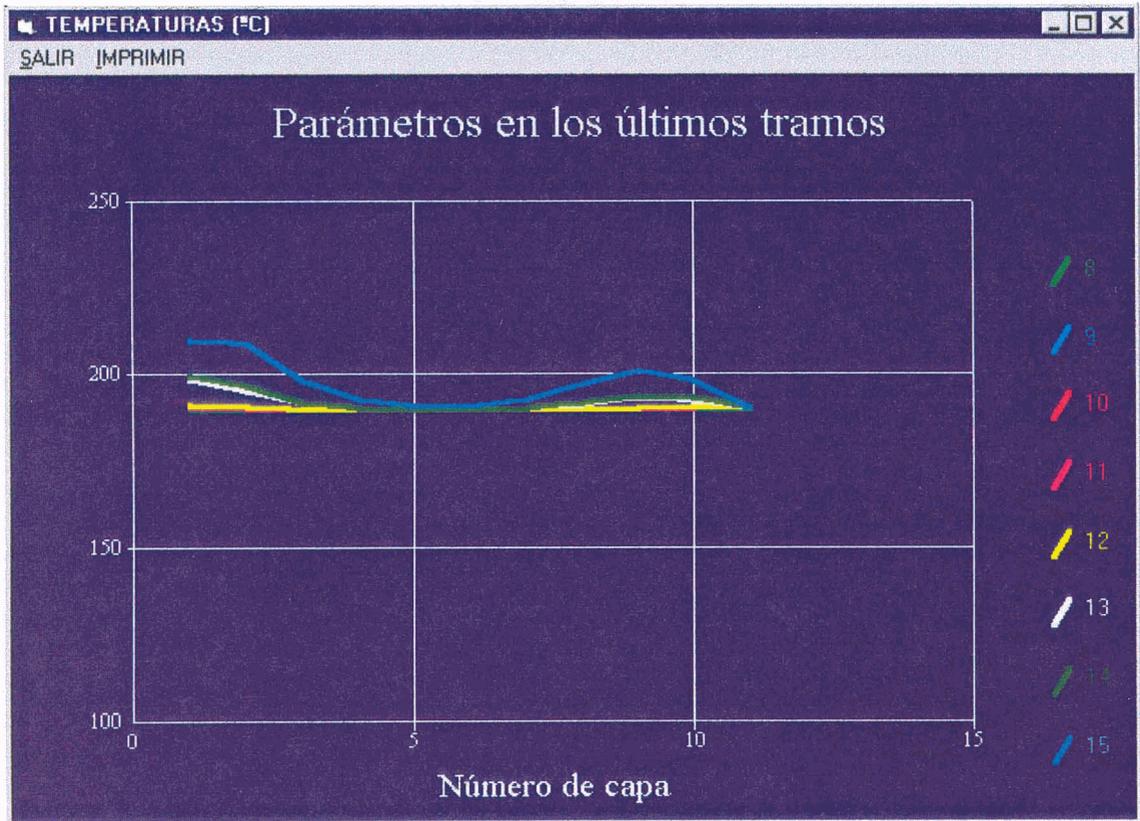


Fig.15.13.- Perfil de temperaturas (°C) en los últimos tramos. R92 modificado.

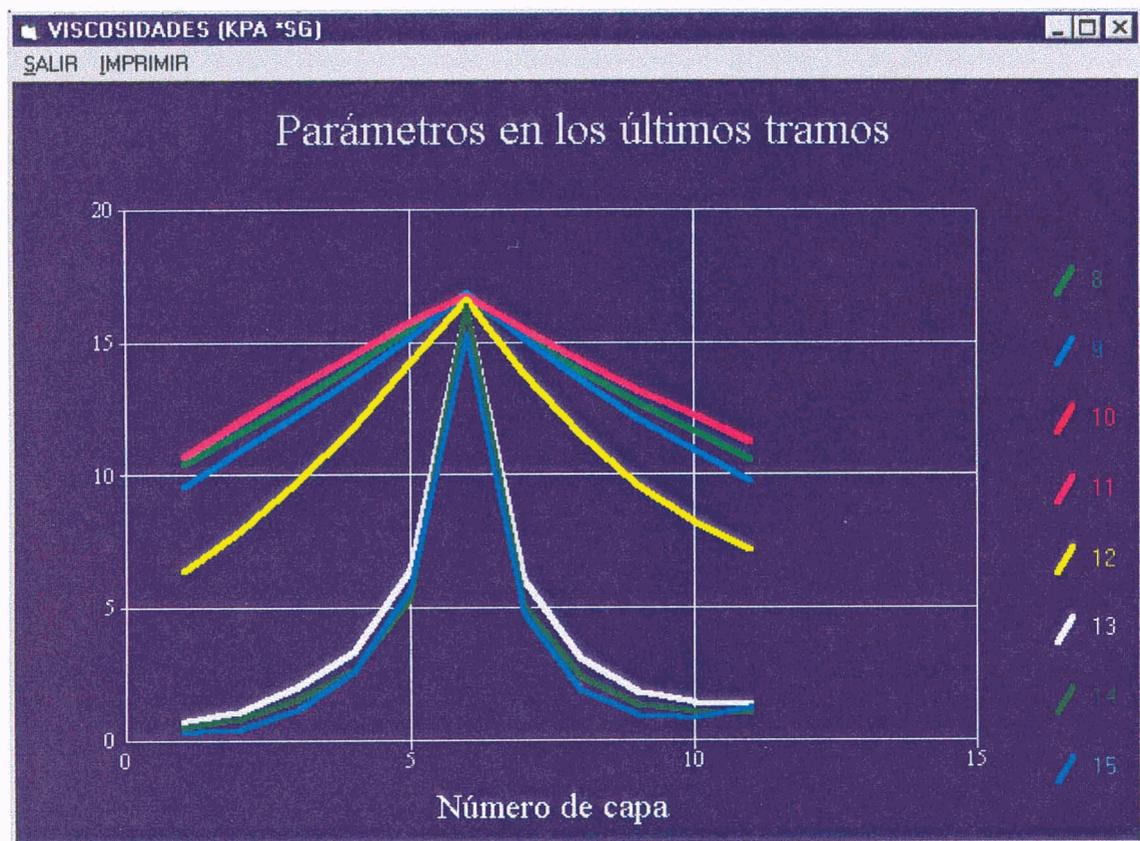


Fig.15.14.- Perfil de viscosidades (Pa*s) en los últimos tramos. R92 modificado.

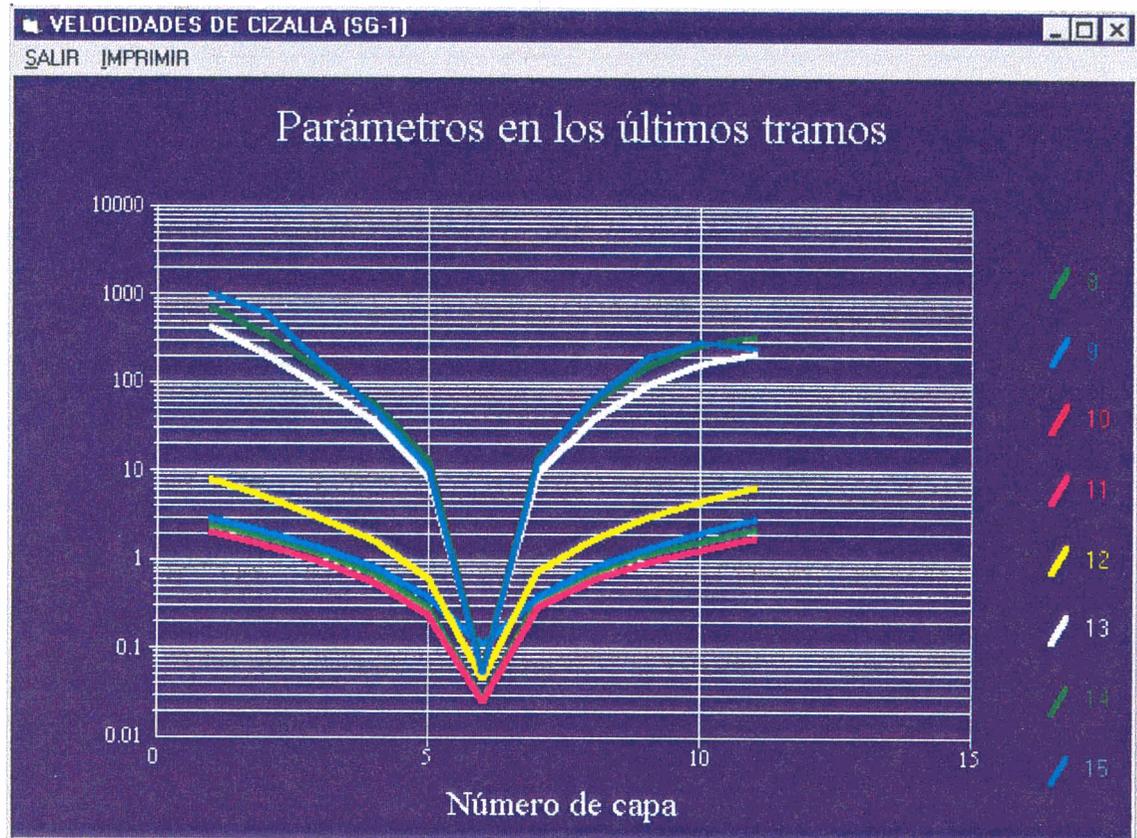


Fig.15.15.- Perfil de velocidades de cizalla (S-1) en los últimos tramos. R92 modificado.

Comparación entre el R92 modificado y el R92 sin modificar

Ya vimos anteriormente como la propia empresa PLASTICAN partiendo del cabezal original R92 (sin modificar) añadió un anillo para conseguir mejoras en el mismo (R92 modificado). Se debió principalmente a que el tubo que salía del cabezal lo hacía con arrugas y ondulaciones superficiales. Este defecto como ya se ha comentado puede obedecer a múltiples causas; lo cierto es que la modificación efectuada de una manera intuitiva consiguió mejorar el producto. Intentemos interpretar el porqué de este hecho con un análisis comparativo de los dos casos. Para ello utilizaremos las mismas condiciones que se plantearon en la prueba con la extrusora.

En los gráficos siguientes apreciamos la evolución de los diferentes parámetros con la producción y para una temperatura de pared de 190°C.

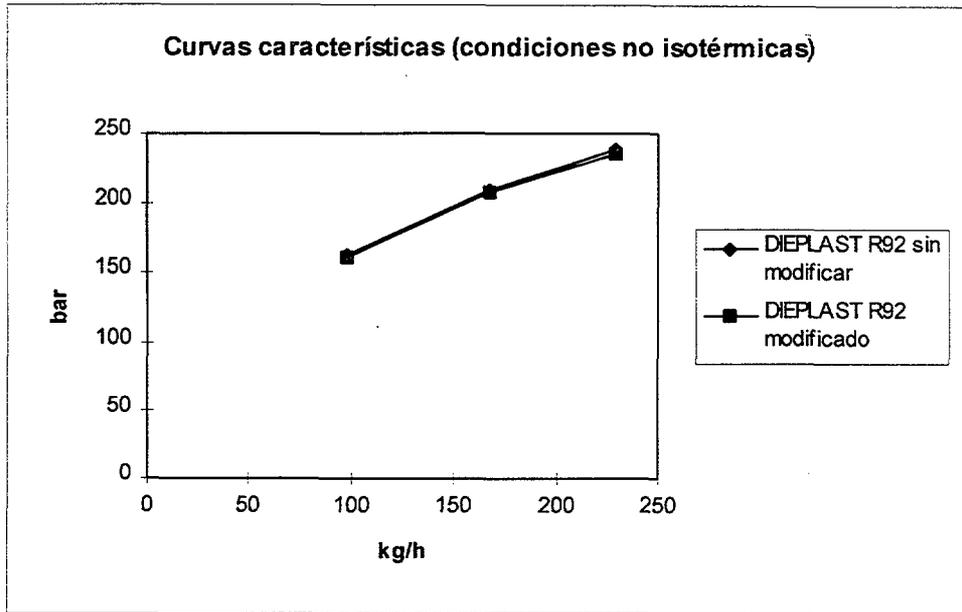


Fig.15.16.- Evolución de las presiones (190°C)

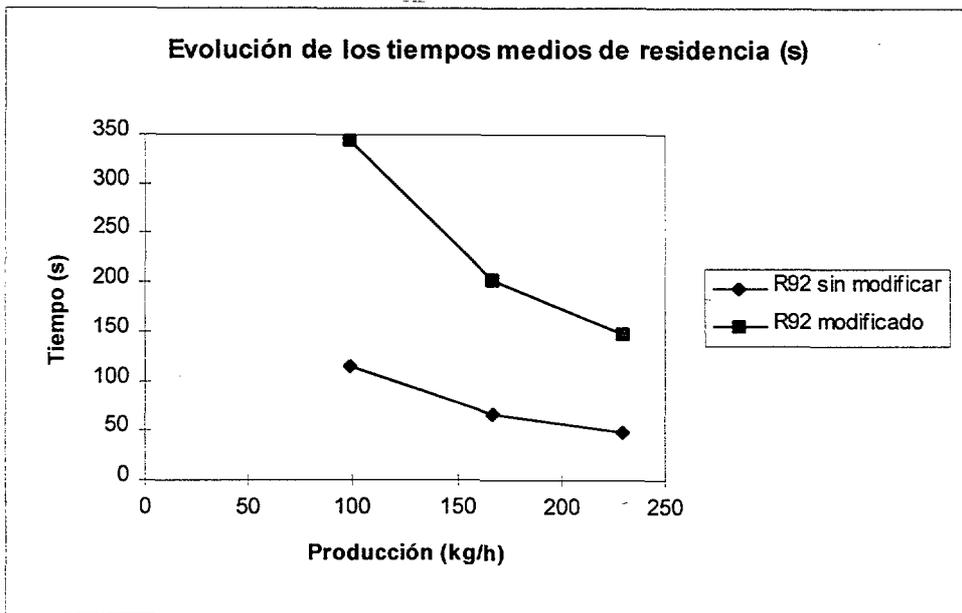


Fig.15.17.- Evolución de los tiempos medios de residencia (190°C)

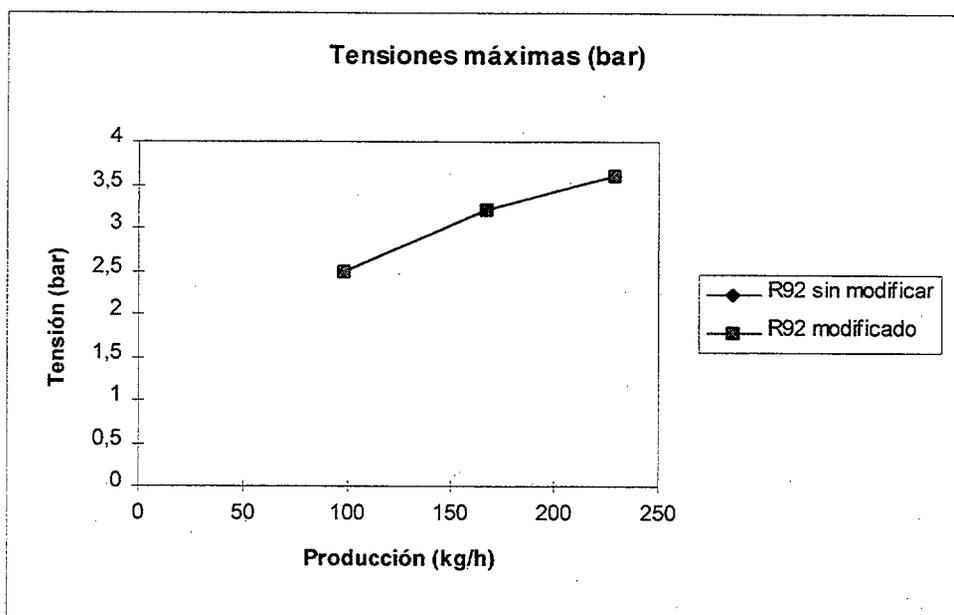


Fig.15.18.- Evolución de las tensiones máximas (190°C)

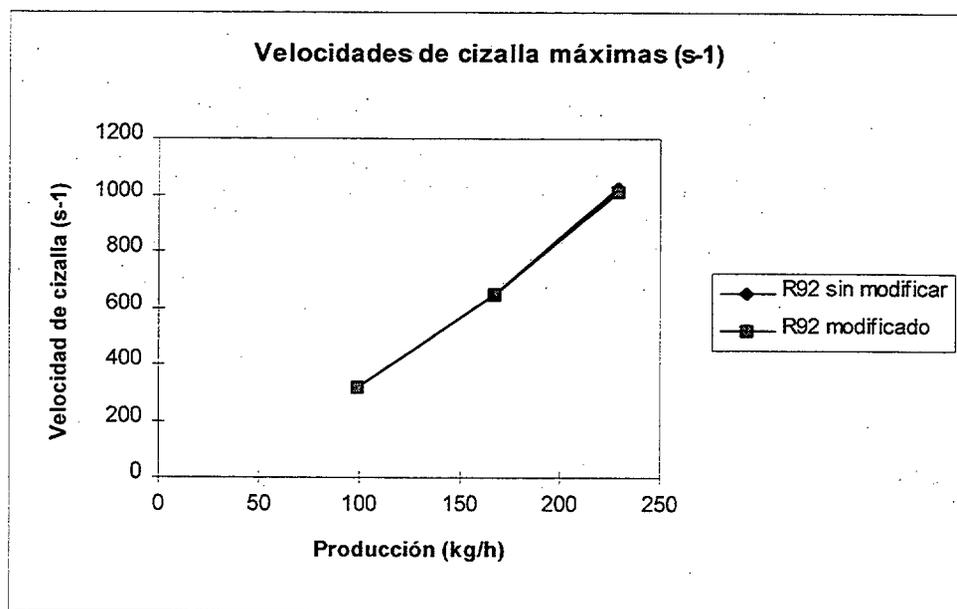


Fig.15.19.- Evolución de las velocidades de cizalla máximas (190°C)

Tras analizar los parámetros que aparecen en las gráficas la primera conclusión es clara, son similares en todos excepto en los tiempos medios de residencia donde las diferencias son muy apreciables. Incluso al contrario de lo que con una primera impresión pudiera parecer nos la presión total en el R92 modificado es ligeramente inferior a pesar del aumento de longitud; el aumento de longitud no ha ocasionado un aumento en las zonas más determinantes de la caída de presión sino que produce un desahogo mayor en las zonas iniciales del canal. Por lo tanto desde un punto de vista de como afectará a la producción incluso la eleva un poco. Por lo tanto cabe preguntarse que motiva una mejora en la calidad del producto cuando la velocidad de cizalla máxima, tensión máxima (ambas en el tramo final) e incluso presión no varían de forma apreciable; la respuesta habrá que buscarla en el tiempo medio de residencia, o en otras palabras el *tiempo medio* que tarda una partícula en recorrer todo el canal de flujo desde la entrada hasta la salida. Un aspecto que caracteriza a este proceso en particular es que el material utilizado es PVC en polvo mezclado con diferentes aditivos. El proceso de *gelificación y homogeneización* no concluye completamente en los husillos de la extrusora sino que queda un porcentaje que lo hace dentro del cabezal. Evidentemente la zona de compresión que existe a continuación del soporte o difusor termina de homogeneizar la masa pero sin embargo todo depende del estado con el que llegue la masa a dicha zona. Por lo tanto parece lógico que si damos más tiempo para que ello ocurra este proceso se podría completar con más éxito. Pues bien lo que en principio se realizó de una manera intuitiva, tal vez sin conocer exactamente que es lo que significaba el cambio, consiguió por un lado no afectar apreciablemente a la presión y por otro lado plastificar mejor el material y en consecuencia resolver los problemas de calidad.

El hecho de no poder utilizar el R92 sin modificar en estas condiciones no significa que no podamos emplearlo en absoluto ya que para producciones más bajas (tiempos de residencia mayores) no tendría que dar problemas; lo que pasa es que lo que busca cualquier empresa no solo es un producto de calidad sino también trabajar a máxima producción (en nuestro caso con las máximas revoluciones de la extrusora). El aumento del tiempo medio de residencia para unas condiciones dadas puede ser una opción interesante pero no olvidemos también que esta actuación puede ocasionar un

efecto negativo muy importante que es la degradación del material por estar sometido a altas temperaturas durante un tiempo excesivo.

Cabe preguntarse por tanto como es que un cabezal adquirido a un fabricante determinado no proporciona unos rendimientos determinados. La respuesta es muy sencilla y consiste en que todo diseño correcto de cabezal va asociado a una serie de factores que influyen de manera determinante y que ya hemos comentado en sobradas ocasiones, el material a extruir, en que condiciones interesa a la empresa trabajar (producción, temperatura) , si la extrusora es capaz de soportar ese cabezal para conseguir dicha producción y todo ésto por supuesto para unos mínimos de calidad. Es importante por lo tanto el recabar el máximo de información al fabricante para no adquirir un utillaje que no se adapte a los requerimientos deseados.

15.4.- Comparación con otros cabezales similares.-

Con vistas a obtener una visión más global del estudio realizado se ha escogido otro cabezal, de un fabricante diferente (URALITA) y que nos permita producir tubos de PVC sanitario de diámetro 110 mm y espesor de pared 2.2 mm. Compararemos el cabezal *R92 modificado* que emplea PLASTICAN con otro que también dispone la empresa y que denominaremos PH3 (Fig. 15.20). Como es habitual este tipo de utillajes permiten mediante el cambio de tobera y macho el acometer una variada gama de diámetros de tubos y espesores.

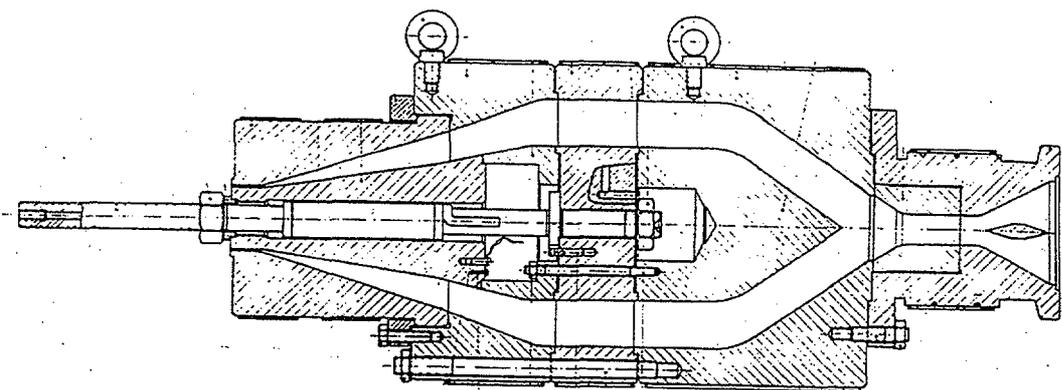


Fig.15.20.- Cabezal PH3. URALITA

Independientemente de las variaciones de tipo constructivo que existen entre el R92 y el PH3 existen unas importantes diferencias en cuanto a las características del canal de flujo entre uno y otro. Si nos centramos en ambos cabezales con el utillaje correspondiente a un diámetro de 110 mm y espesor de 2.2 mm podemos resumir unas pocas características geométricas del canal de flujo que plasmamos en la siguiente tabla.

| | R92 modific. | PH3 |
|---|-----------------|--------|
| Longitud total del canal (mm) (no incluido adaptador) | 674.3 | 1010.9 |
| Diámetro máximo exterior del canal (mm) | 174 | 340 |
| Longitud de relajación (mm) | 42 | 39 |
| Longitud del soporte o difusor (mm) | 50 | 108 |
| Diámetro del macho (mm) | 106.5 | 106.4 |
| Diámetro de tobera (mm) | 109.9 | 110 |
| Diámetro exterior del soporte o difusor (mm) | 172 | 340 |

Tabla 15.7.- Características más destacadas de los canales de flujo

Parece muy claro que el PH3 está pensado para cubrir una gama de diámetros mayores que el R92 con lo cual el cuerpo que permanece fijo debe soportar toda la gama. Esta característica que es muy operativa por su versatilidad puede ser un inconveniente ya que no se pueden conseguir resultados óptimos para toda la gama y menos cuanto mayor sea ésta. En cualquier caso si montamos tanto para uno como para otro los machos y toberas que nos ocupan observamos diferencias muy apreciables. Destacan la mayor longitud total del PH3 y la también mayor relación de compresión a que es sometido el material a la salida del soporte; el PH3 tiene una relación de 3.1 y el R92 de 1.56 (prácticamente la mitad). En cuanto a las longitudes de relajación son bastante cercanas y el espesor de salida es superior en el PH3 (1.8 mm) frente al R92 (1.7 mm).

Introducida la geometría del PH3 y R92 en DIEPLAST e introduciendo las mismas condiciones de trabajo que vimos en apartados anteriores, con una temperatura de pared de 190°C se resumieron los parámetros básicos que nos ayuden a comparar ambos diseños. El método de cálculo es numérico en condiciones no isotérmicas. Los parámetros los presentamos en forma de gráficos para varias producciones.

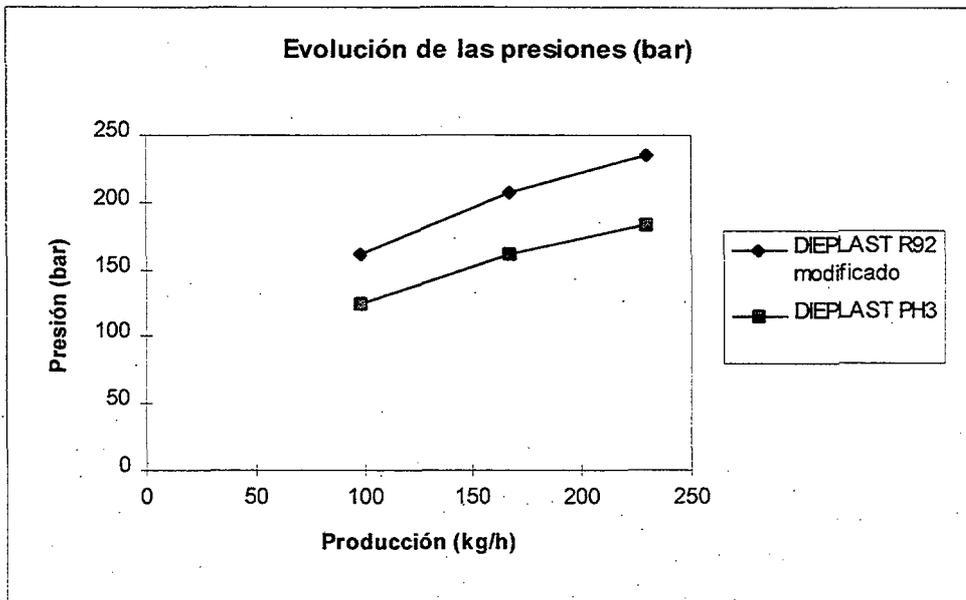
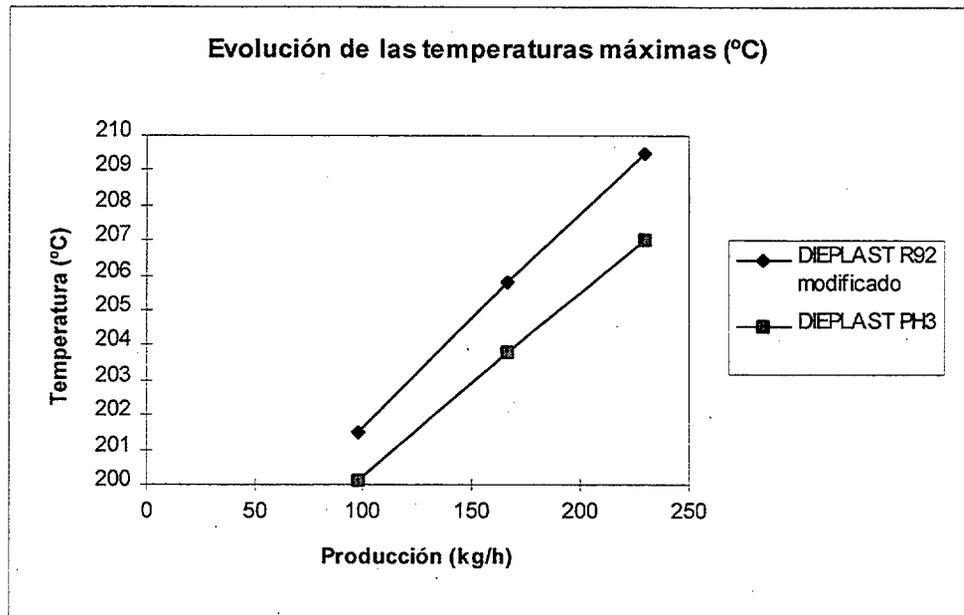


Fig.15.21.- Evolución de presiones (Temperatura de pared 190°C)



15.22.- Evolución de temperaturas máximas (Temperatura de pared 190°C)

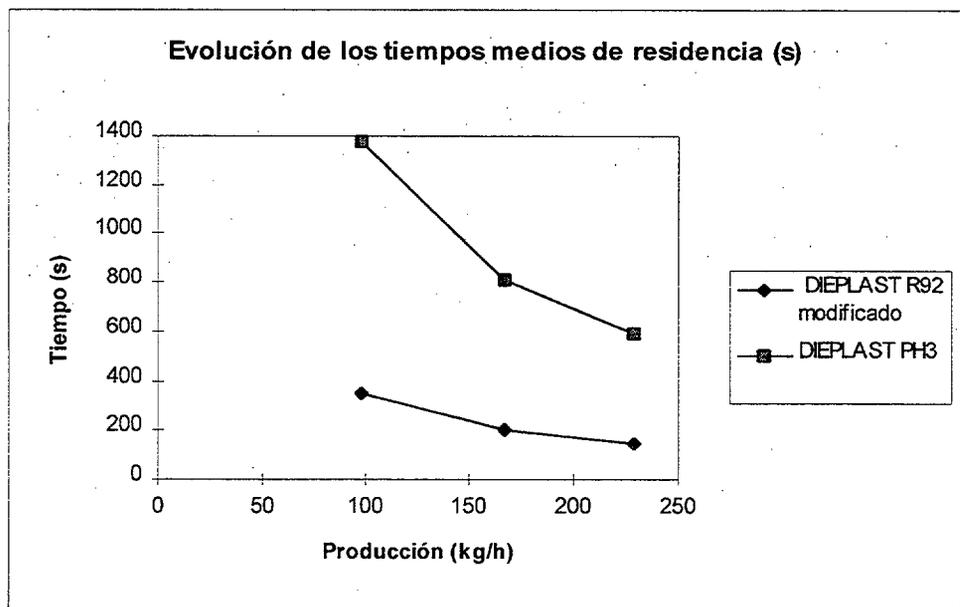


Fig.15.23.- Evolución de tiempos medios de residencia (Temperatura de pared 190°C)

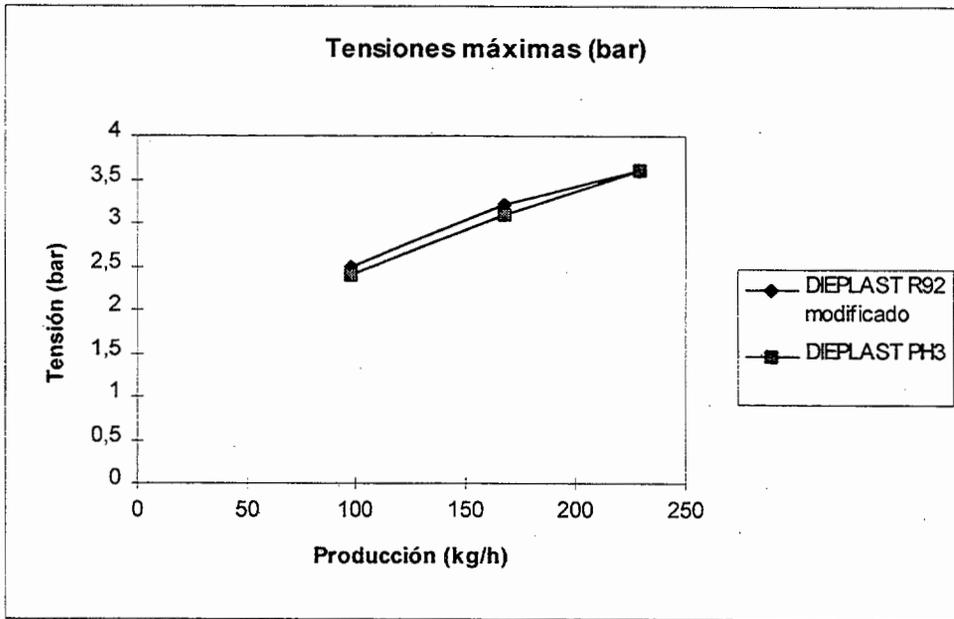


Fig.15.24.- Evolución de las tensiones máximas (Temperatura de pared 190°C)

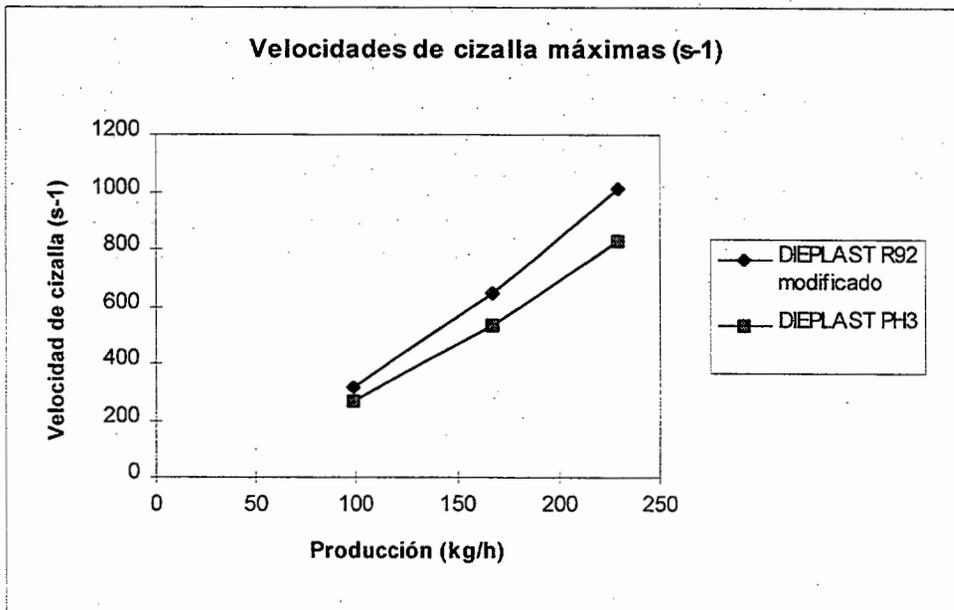


Fig.15.25.- Evolución de velocidades de cizalla máximas (Temperatura de pared 190°C)

Vemos que no solo se trata de dos cabezales diferentes geoméricamente sino que los resultados del flujo también difieren de manera apreciable. Si comparamos los resultados de ambos de acuerdo a los gráficos sacamos las siguientes conclusiones:

1.- Para toda la gama de producciones estudiada las presiones obtenidas con el PH3 son inferiores a las del R92 (Fig. 15.21). Como referencia para la producción que en el R92 modificado supone el punto de equilibrio a máximas revoluciones obtenemos un valor de presión un 22% inferior en el caso del PH3. Significa ésto que si por ejemplo trabajamos con el máximo número de revoluciones de los husillos obtendremos un punto de corte de la curva de la extrusora con la del cabezal que nos proporciona una producción mayor (Q_e) y una presión menor (P_e) (Fig. 15.26). En otras palabras el PH3 tiene un mayor rendimiento.

2.- Las temperaturas máximas que aparecen en el PH3 son ligeramente inferiores a las del R92 (Fig.15.22) quizás debido a que el espesor de salida del PH3 es una decima de mm superior.

3.- Los tiempos medios de residencia del PH3 son muy superiores al del R92 (Fig. 15.23). Ésto es bueno desde el punto de vista de dar mayor tiempo a la plastificación y gelificación del material al ir mas lenta cada partícula. No obstante trabajar con el PH3 a bajas revoluciones (poca producción) seguramente ocasiona problemas de degradación del material con lo cual habría que utilizar las máximas.

4.- Las tensiones de cortadura son ligeramente inferiores en el PH3 que en el R92 aunque de forma no muy significativa (Fig. 15.24).

5.- Las velocidades de cizalla son también algo inferiores en el PH3 (Fig.15.25) lo que produce una cierta mejoría entre otras cosas en la potencialidad de deformación a la salida.

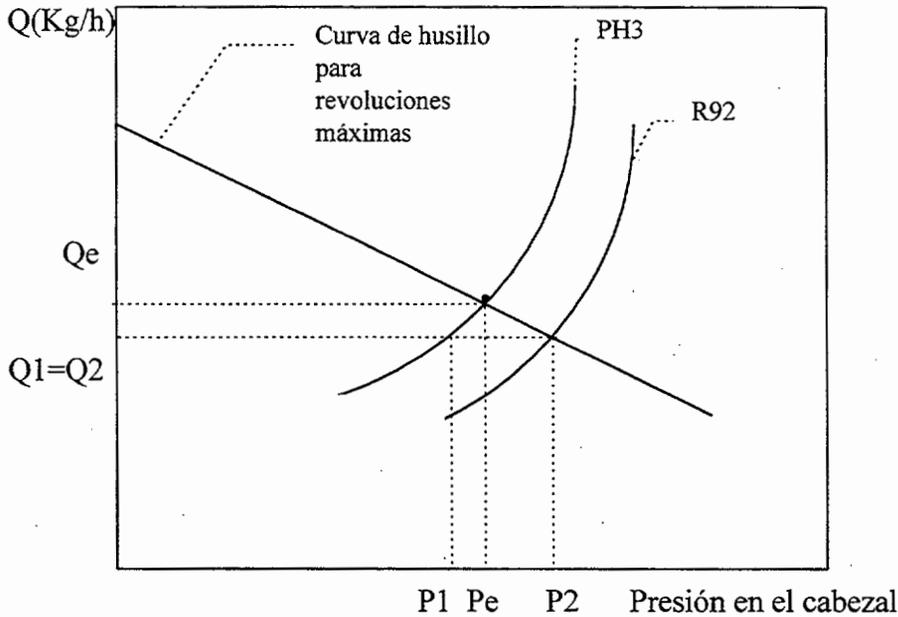


Fig. 15.26.- Rendimientos de PH3 y R92. $Q_e > Q_2$.

Con todas estas consideraciones ¿Podemos decir que el PH3 es mejor cabezal que el R92 modificado?, la respuesta depende por ejemplo si la empresa considera como objetivo principal la mayor producción posible con unos parámetros de calidad aceptable y de acuerdo a la extrusora disponible; en ese caso lógicamente la respuesta es el PH3. Sin embargo hay otras variables de tipo operativo como puede ser un volumen de cabezal muy superior que conlleva mucho gasto energético para mantener una temperatura o simplemente un costo de utillaje superior, etc. Puede ocurrir que un pequeño aumento de producción no compense estos otros aspectos. En cualquier caso queremos decir que no siempre hay que quedarse exclusivamente con ventajas y desventajas de tipo reológico sino también sería recomendable hacer un planteamiento más global en el marco de la propia empresa.

15.5.- Estudio de posibles alternativas de mejora.-

Tomando como referencia el cabezal R92 nos planteamos el buscar una solución constructiva factible y que mejore sustancialmente la versión original. Claro está que tal como vimos en apartados anteriores la empresa Plastikan realiza un cambio añadiendo un anillo exterior que aumenta la longitud del cabezal en 200 mm.; modificación que como también se ha comentado sirvió para mejorar el producto final sin pérdida en el rendimiento productivo. En este apartado intentaremos proponer una alternativa válida apoyándonos en DIEPLAST pero con una premisa fundamental: la solución elegida se debe sustentar sobre el diseño original del R92 de tal manera que no signifique un cambio tan radical que haga inviable la propuesta. Tengamos en cuenta que no se trata de realizar un diseño totalmente nuevo sino de aprovechar el utillaje que se dispone con cambios sencillos con los medios disponibles.

Teniendo en cuenta la anterior premisa, los parámetros de diseño deseados y la experiencia obtenida de las pruebas experimentales sobre el R92 modificado se inició un proceso por el cual se establecieron diferentes geometrías que fueron analizadas en determinadas condiciones de trabajo. Como resultado de todo el proceso se llegó a una que sin asegurar que sea la óptima si podemos decir que cumple perfectamente con los requerimientos. La variación constructiva con respecto al R 92 original (para tubos de 110 x 2.2) es la siguiente (Fig. 15.27) :

- * Se añade un anillo exterior de 200 mm de longitud.
- * Se añade un suplemento al torpedo del mandril interior. Con dicho suplemento conseguimos un alargamiento de 54 mm antes de llegar al difusor. Esta pieza es muy fácil de mecanizar incluso con máquinas herramienta convencionales al tener una geometría sencilla.
- * En la tobera realizamos un simple mecanizado interior (de una décima de milímetro) hasta llegar a la dimensión de 110 mm en diámetro.
- * En el macho (en la zona de relajación) mecanizamos dos décimas reduciendo el diámetro del mismo.

* Tanto la zona de relajación (último tramo) del macho como de la tobera la recortamos hasta llegar a 37 mm de longitud. Esta operación también es muy simple de efectuar mediante un refrentado.

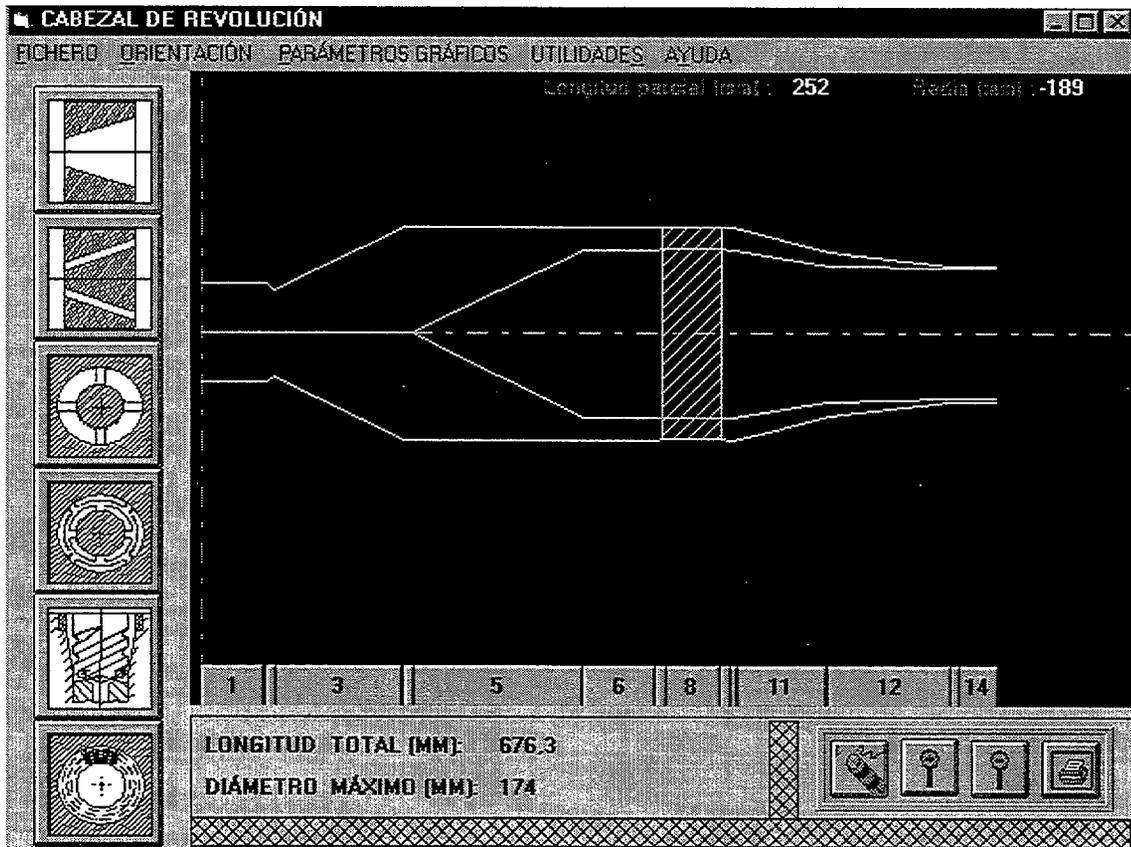


Fig.15.27.- Solución propuesta al R92 original.

Antes de entrar a analizar los diferentes parámetros decir que se ha producido un cambio en la zona de salida del cabezal que como sabemos juega un papel fundamental. Para el nuevo dimensionamiento se ha utilizado la opción de orientación que dispone DIEPLAST en el menú de diseño gráfico y que nos sirve en función del producto y del material para obtener automáticamente unas dimensiones basadas en la experiencia acumulada en la industria de la extrusión. Esta orientación también afecta al propio difusor pero dado que cambiar el difusor supondría una variación importante y difícil de llevar a cabo por la empresa se desestimó su modificación.

Otro aspecto que se ha tenido en cuenta es que el tiempo de residencia en función de la producción deseada se encuentre dentro de la franja recomendada para los cabezales de fabricación () (Fig.15.28). Precisamente se ha comprobado que para la producción de 229 Kg/h el cabezal R92 original se encuentra con un tiempo medio de residencia que se encuentra prácticamente en la frontera admisible.

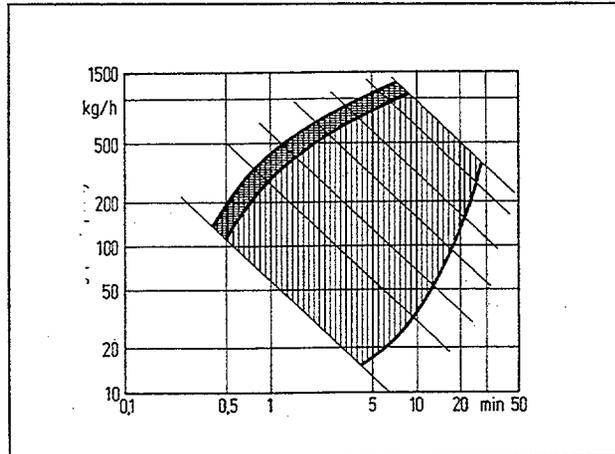


Fig.15.28.- Franja de trabajo recomendable

Para las pruebas se utilizó la máxima producción que admite el R92 modificado, es decir 229 Kg/h, con una temperatura de pared de 190°C y para el PVC sanitario. Los cálculos han sido hechos en condiciones no isotérmicas y método numérico. La comparación la realizamos entre el R92 modificado y el R92 propuesto por el presente trabajo (ambos simulados con DIEPLAST).

| | Velocidad de cizalla máxima (Sg-1) | Tensión de cortadura máxima (Bar) | Temperatura máxima (°C) | Presión (Bar) | Tiempo medio de residencia (Sg) |
|----------------------|---|--|----------------------------|---------------|--|
| R92 modificado | 1014 | 3.6 | 209.5 | 235.5 | 147 |
| R92 propuesto | 800 | 3.4 | 207.3 | 193.7 | 135 |

Tabla 15.8.- Mejoras obtenidas con el R92 propuesto en relación al R92 modificado.

Observando los resultados de la tabla 15.8 las conclusiones que sacamos son las siguientes:

* La velocidad de cizalla máxima y tensión de cortadura máxima se ven disminuidas con el R92 propuesto, debido principalmente a una pequeña abertura en la salida del cabezal. La variación no es tan importante pero en cualquier caso evoluciona hacia mejor (la menor velocidad de cizalla incide por ejemplo en una disminución del efecto de reagrupamiento de velocidades a la salida.

* A consecuencia de la ampliación de la abertura de salida la temperatura máxima también disminuye ligeramente debido a una disminución de la fricción.

* El efecto que se produce sobre la presión total se debe a dos causas; la primera es la ampliación del tramo posterior al comienzo del torpedo de tal manera que incrementamos el recorrido en tramo anular, lo cual produce una mayor presión. Sin embargo el desahogo y acortamiento de longitud que se ha producido a la salida implica una importante reducción de la presión que contrarresta el anterior incremento. Globalmente disminuye y en consecuencia tenemos que según comprobamos en el diagrama de la figura 15.26 si trabajamos a las máximas RPM del husillo podemos obtener una *producción superior*.

* El tiempo de residencia a pesar de existir menos volumen antes del torpedo resulta menor que el R92 modificado pero no demasiado. En cambio si es un valor muy superior al que obtuvimos para el R92 original. Es un tiempo que es lo suficientemente grande para permitir un mayor grado de gelificación y homogeneización del material.

El añadir un tramo anular mas largo a continuación del torpedo produce un mayor grado de compresión en el recorrido del material lo que favorece su homogeneización y en consecuencia una mejor calidad.

La zona de relajación ha sufrido un pequeño recorte que en principio no tendría que afectar excesivamente a la deformación del extrusado a la salida. Al no disponer de datos sobre los parámetros del PVC que hacen referencia a la deformación no podemos estimar al menos lo que ocurre. El PVC no es precisamente de los materiales que más se ensanchan (10 a 35%) al salir del cabezal (pensemos por ejemplo en las poliolefinas) y ello lo podemos notar precisamente en las longitudes *típicamente cortas* de los cabezales que utilizan este material.

La conclusión que sacamos con la propuesta es que con un pequeño cambio perfectamente factible y sin excesivo costo mejoramos la producción para una calidad similar.

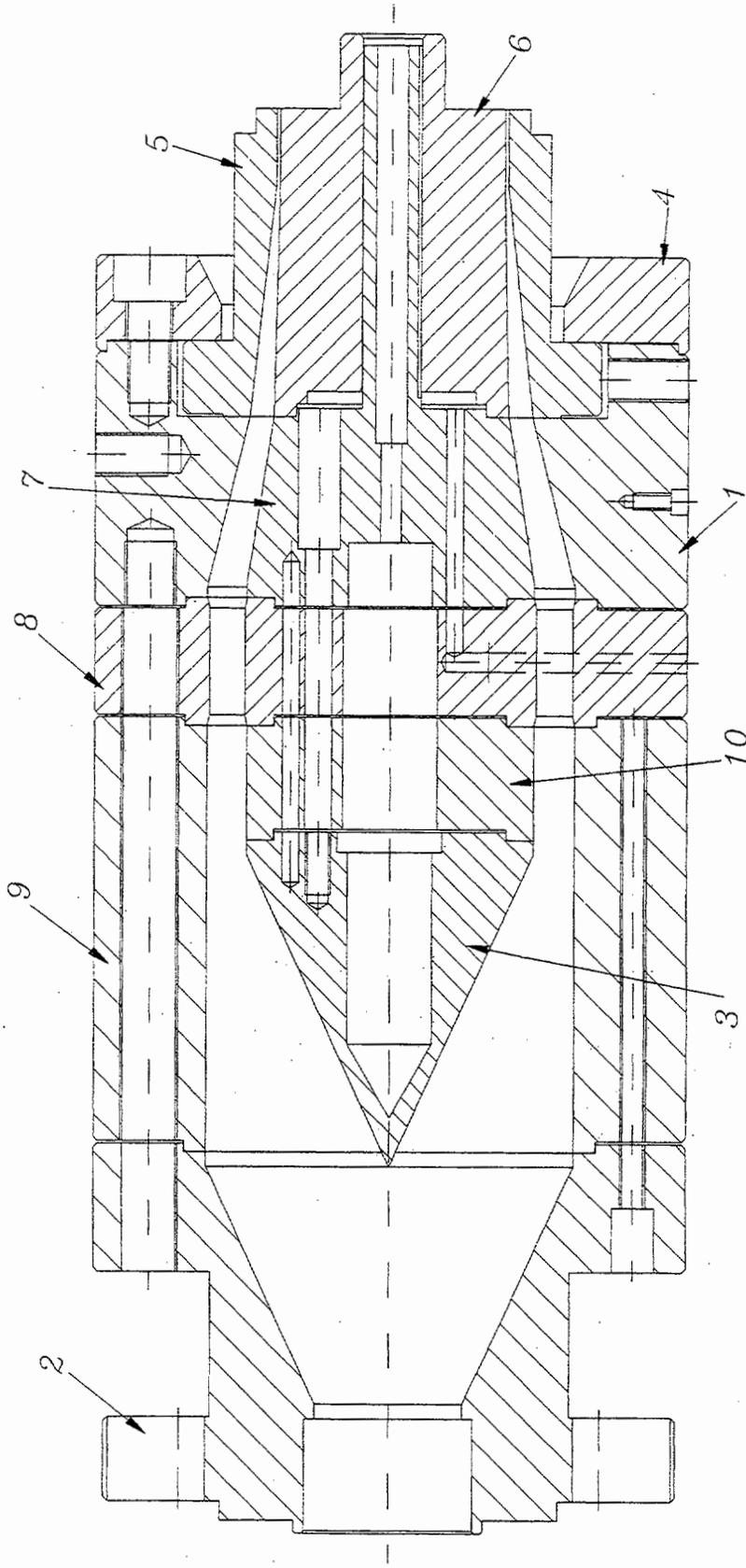


Fig.15.29.- Cabezal R92 propuesto

BLOQUE V

CONCLUSIONES Y LÍNEAS

FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

16.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.-

Conclusiones

El presente trabajo ha cumplido en gran medida los objetivos planteados en un principio, donde además de establecer una nueva metodología de trabajo para afrontar el diseño de cabezales se ha desarrollado una herramienta dirigida principalmente a tecnólogos del campo de la extrusión. El proceso seguido ha significado un largo camino dado el escaso volumen de estudios que desde un punto de vista teórico-práctico existe no solo en España sino también a nivel europeo y mundial. Por lo tanto para establecer la metodología de trabajo se han tenido que recopilar gran cantidad de aspectos sin conexión entre sí, como son diferentes métodos de cálculo, geometrías, criterios de diseño, soluciones constructivas, etc. La dificultad se ve incrementada ante las lagunas que todavía existen en el estudio de determinados puntos en la extrusión; uno de ellos por ejemplo corresponde a la estimación de la deformación del extrusado a la salida sobradamente comentada.

Todas las posibilidades que existen en cabezales de simetría circular o rectangular se han sintetizado en una serie de métodos de cálculo que implementa la herramienta que hemos denominado DIEPLAST. Con dicha herramienta se han presentado un amplio número de supuestos pertenecientes a ejemplos simplemente teóricos que han utilizado diversos autores y supuestos que corresponden a cabezales reales utilizados bien en estrusoras de laboratorio bien en extrusoras industriales; en su mayor parte la correspondencia de los resultados es bastante aceptable lo que implica que la validez de uso de DIEPLAST desde un punto de vista industrial es más que suficiente.

Una de las principales aportaciones pensamos que ha sido una nueva visión sobre el método de trabajo para afrontar el proceso de definición de un cabezal, donde se ha evitado un estudio puramente analítico y se ha optado por una interactividad que agilice la convergencia rápida a la solución más favorable, todo ello con una gran dosis de sencillez.

Líneas futuras de investigación

A pesar de tratarse de geometrías sencillas en lo referente a los canales de flujo, en combinación con diferentes tipologías de distribuidores, que cubren un interesante campo de productos extrusionados de uso cotidiano; se haría necesario un complemento del trabajo en los siguientes puntos:

- Estudio de cabezales para coextrusión.
- Ampliación de la tipología utilizada a los cabezales llamados de *plato* o *disco* donde la hilera final es una sección constante que se puede modelizar como combinación de geometrías simples (círculos, rectángulos) y que permiten la obtención de perfiles de muy diferente naturaleza.
- Aunque el cabezal se puede considerar como un elemento independiente del conjunto de la extrusora por razones lógicas y de tipo operativo no es menos cierto que para definir el punto de producción habría que tener en cuenta por un lado el husillo y por otro el cabezal. Queremos indicar con esto que sería interesante, para optimizar aún más el proceso, un estudio paralelo de ambos elementos, donde se entrara a valorar la interactividad de los diseños y condiciones de trabajo de los dos.
- Estudio del cabezal desde un punto de vista mecánico y térmico.
- Es norma habitual en la industria de la extrusión no cambiar todo el conjunto del cabezal cuando se cambia de dimensiones en el producto fabricado (por ejemplo el diámetro de un tubo); se desmonta tan solo una parte del utillaje. Esta circunstancia obliga al diseñador a preveer una amplia gama de posibilidades sobre una estructura común de tal manera que sin llegar a optimizar para uno en concreto si se optimice al máximo en su conjunto. Para ello se debería tener la combinación de un software en la línea de DIEPLAST con programas de diseño estándar (Microstation, Autocad, etc), que trabajando de forma parametrizada nos proporcione toda la familia de utillajes que cubran la gama deseada.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- M.J. Crochet, B. Debbaut, R. Keunings and J.M. Marchal. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser (1992) pp. 25-50.
- 2.- Tseng, Han-Hsiu. Software Design and Experimental Verification of Polymer Flow Trough a pipe Extrusion Die. University of Lowell. Massachussets. USA. 1991.
- 3.- Paul B. Junk. Considerations on Melt Behaviour in Continuous Extrusion Blow Moulding. Fakultät Für Maschinenwesen Der Rheinisch-Westfalischen Technischen Hochschule Aachen. Germany 1978.
- 4.- E. Mitsoulis. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser. 1992 pp. 51-81.
- 5.- J. Vlachopoulos, N. Silvi and J. Vlcek. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 85-101.
- 6.- I. Klein and R. J. Klein. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 103-252.
- 7.- W. Michaeli et al. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 271-304.
- 8.- Catálogos y demos del programa PROWEX (Coex, Vertigo, Wenverti, Avexid, Deform). IKV, Institut für Kunststoffverarbeitung. Aachen. Alemania.
- 9.- W. Michaeli et al. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 305-326.
- 10.- E. C. Bernhardt, G. Bertacchi and A. Moroni. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 467-485.

- 11.- D. H. Sebastian and R. Rakos. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 403-447.
- 12.- N. S. Rao, K.J. O'Brien and D.H. Harry. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 459-466.
- 13.- J. Vlcek, J. Perdikoulas and J. Vlachopoulos. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Ed. Hanser . 1992. pp. 487-504.
- 14.- Manual del programa POLYFLOW. Louvain La Neue- Belgium. Poliflow S.A.
- 15.- Walter Michaeli. Extrusion Dies for Plastics and Rubber. Ed. Hanser . 1992.
- 16.- K. Savgorodny. Transformación de plásticos. Ed. G.G. 1973.
- 17.- Información suministrada por el grupo URALITA referente a tolerancias para tubos de PVC.
- 18.- Friedhelm Hensen. Plastics Extrusion Technology. Hanser . 1988.
- 19.- Matsuoka. Relaxation Phenomena in Polymers. SPE. Hanser. 1992.
- 20.- J.A. Puertolas. Termoplásticos: Estructura y Propiedades Físicas. Seminario de Inyección. T.I.I.P. Zaragoza 1993.
- 21.- Chris Rauwendaal. Polymer Extrusion. Hanser . 1986.
- 22.- A.J. Gooszen. Current Developments in PVC-Pipe Extrusion. Rohrsymposium Cincinnati Milacron. Austria. Octubre 1991.
- 23.- J. Dobrowsky. Helical Distribution Tools in Pipe Production. Cincinnati Milacron. Viena 1991.

-
- 24.- Catálogos de Cincinnati Milacron referente a cabezales helicoidales PH-PO.
- 25.- J. Dobrousky. Tools for Polyolefine Pipes. Cincinnati Milacron AG. Vienna. 1991.
- 26.- Angel Fernández, Herramientas CAD-CAE para el Diseño y Presupuesto de Moldes para Inyección de Termoplásticos. T.I.I.P. Universidad de Zaragoza. 1995.
- 27.- Rao, N.S. Design Formulas for Plastics Engineers. Hanser. Munich. 1991.
- 28.- Williams, M.L. et al : The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids. J.Am.Chem. Soc. 77 . 1955. 7, pp. 3701-3706.
- 29.- Frank M. White. Mecánica de Fluidos. Mc. Graw Hill.
- 30.- H. Overeinder. PVC Extrusion Technology. Rohrsymposium Cincinnati Milacron. Austria. Octubre 1991.
- 31.- Charles L. Tucker III. Computer Modeling for Polymer Processing. Hanser . 1989.
- 32.- Chmiel, H., Schümmer, P. : Eine Neue Methode zur Auswertung Von Rohrrheometer Daten. Chem. Ing. Techn. 43 (1971) 23, pp. 1257-1259.
- 33.- Wortberg, J. : Werkzeugaugen zum Schmelzeuerhalten beim Kontinuierlichen Blasformen. Thesis at the RWTH Aachen. 1978.
- 34.- J. Sun, P. Chen, SX Zheng, Y M Zhang. An Interactive Computer Program for Rheological Calculation of injection mould. Department of Mechanical Engineering. Huazhong University. Wuhan, China.
- 35.- W. Michaeli. Extrusion des Matieres Plastiques. MCM Conseil. Villeurbanne. 1984.

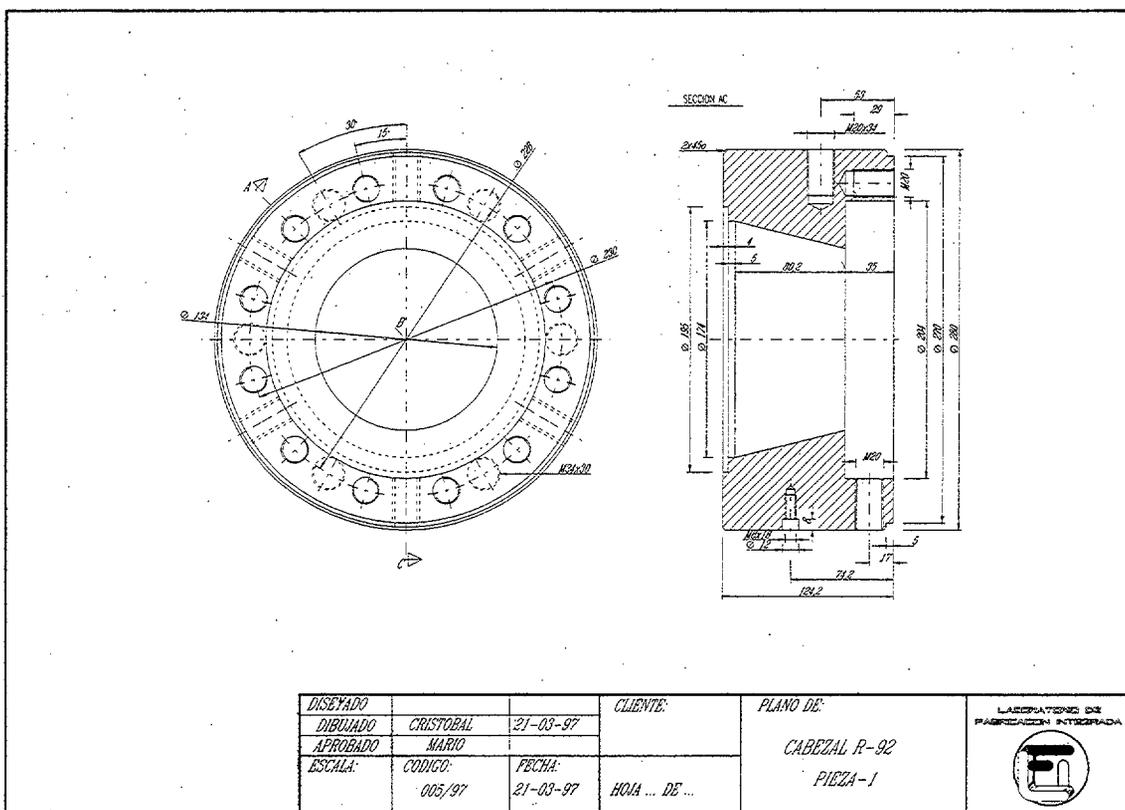
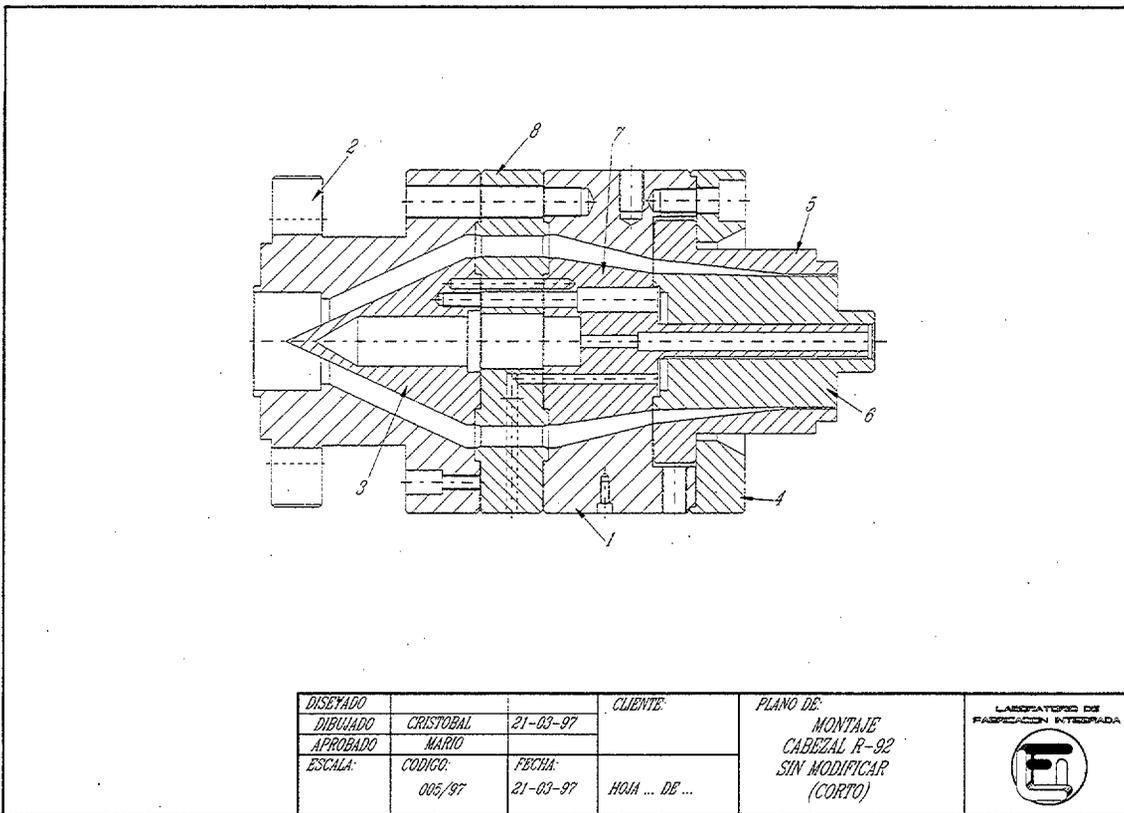
- 36.- Keith T. O'Brien. Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes. Hanser. 1992.
- 37.- Procter, B .Flow Analysis in Extrusion Dies. SPE- Journal, 28 (1972), p.2.
- 38.- N. Orbey, J.M. Dealy. Isothermal Swell of Extrudate from Annular Dies; Effects of Die Geometry, Flow Rate, and Resin Characteristics. Polymer Engineering and Science, May, 1984, vol 24, N° 7.
- 39.- G. Ajroldi, Polymer Engineering. Science, 18, 742 .1978.
- 40.- J.M. Dealy and N. Orbey, Aiche Journal, 31, 807 .1985.
- 41.- E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos. A Numerical Study of the Effect of Normal Stresses and Elongational Viscosity on Entry Vortex Growth and Extrudate Swell. Polymer Engineering and Science, Mid-August, 1985, vol.25. N° 11.
- 42.- H.M. Laun. Description of the Non-Linear Shear Behaviour of a Low Density Polyethylene Melt by Means of an Experimentally Determined Strain Dependent Memory Function. Rheologica Acta. January/February 1978. Vol 17. N° 1.
- 43.- Von Joachim Meißner. Rheometer zur Untersuchung der Deformationsmechanischen Eigenschaften von Kunststoff-schmelzen Unter Definierter Zugbeanspruchung. Rheologica acta. Band 8. Heft 1 .1969.
- 44.- J. Vlachopoulos and E. Mitsoulis. An Appraisal of the Exit Pressure Method for Normal Stress Measurements. Journal of Polymer Engineering. Vol. 5, N° 2. 1985.
- 45.- Patrick Brousseau. Numerical Study of Extrudate Swell in Circular and Annular Dies. Thesis at the Department of Chemical Engineering. McGill University. Montreal. Canada. 1990.

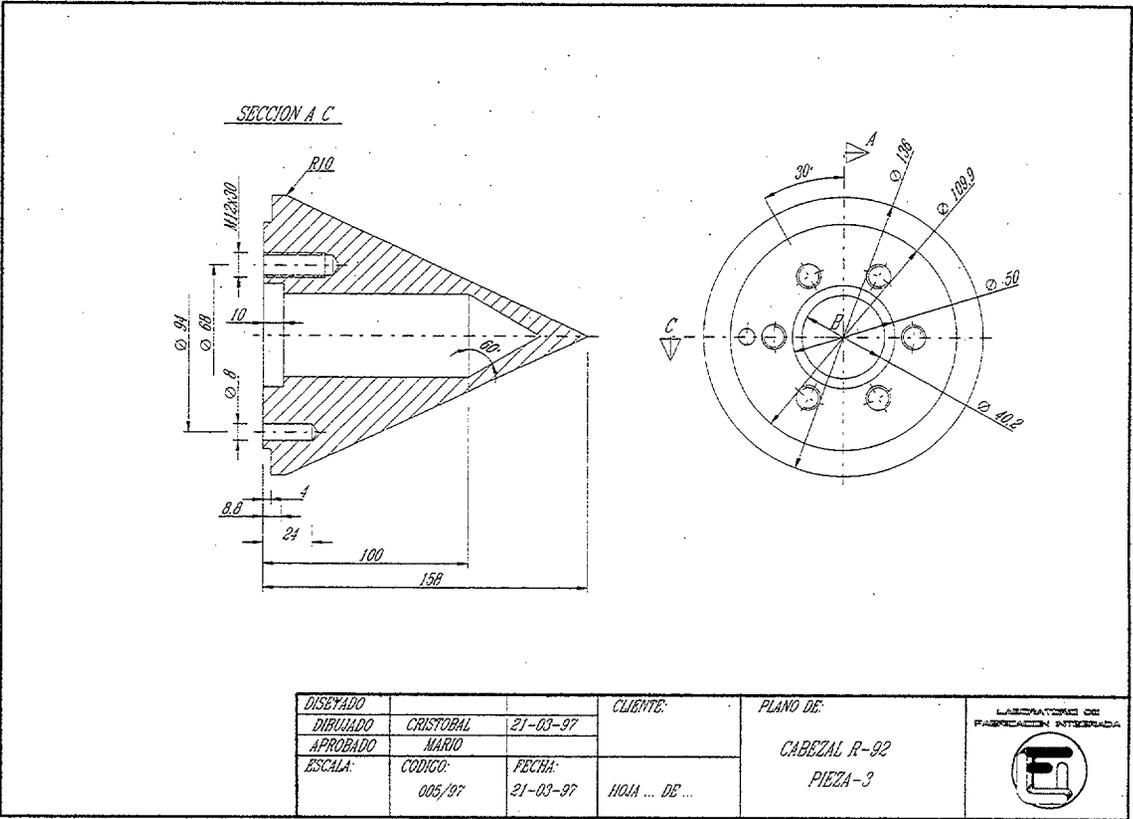
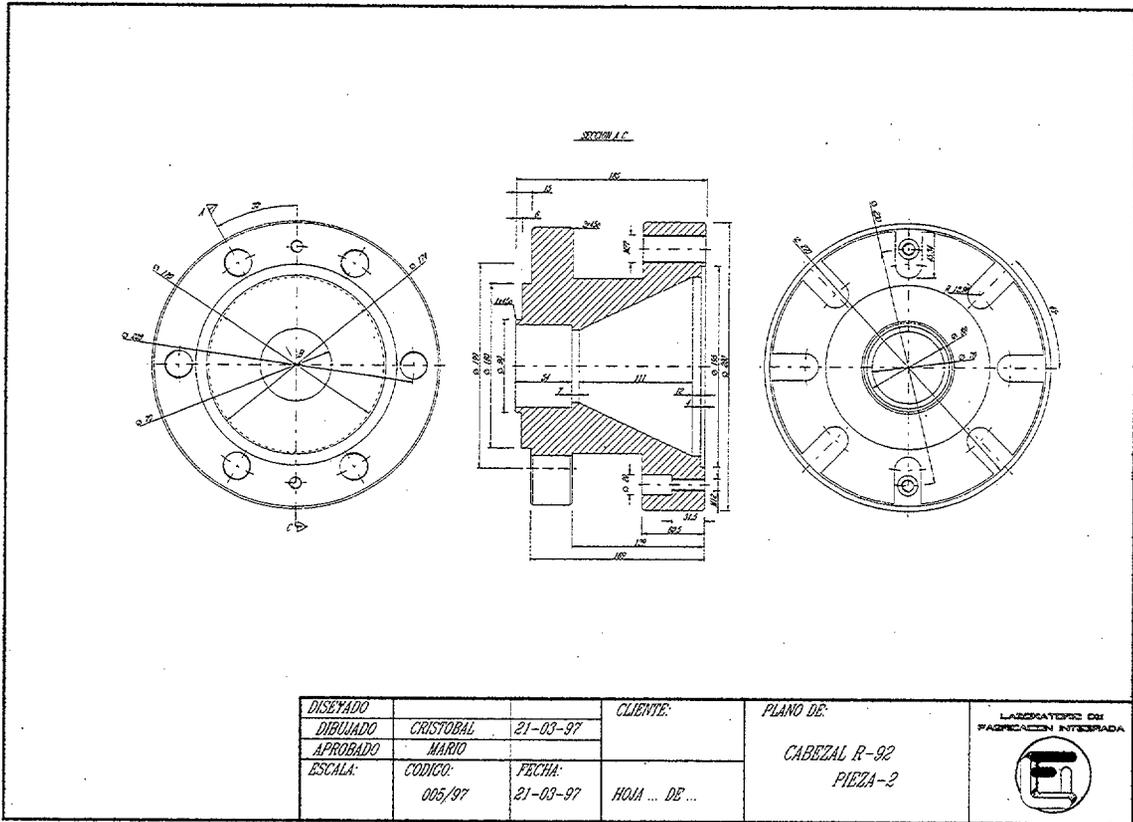
-
- 46.- Programa MATHCAD V5. Mathsoft.
- 47.- Institut für Kunststoffverarbeitung. Rhein- Westf. Technische Hochschule Aachen. Germany.
- 48.- Manual de usuario reómetro Gottfert-1500.
- 49.- Beatriz Sánchez Tabuenca. Seminario de Inyección. T.I.I.P. Zaragoza. 1993.
- 50.- L. Avendaño. Iniciación a los plásticos. Centro Español de Plásticos.
- 51.- Gordon/Shaw. Computer Programas for Rheologists. SPE. Hanser .1993.
- 52.- Mario Monzón, Pedro Hernández. Introducción a la Tecnología de Extrusión de Termoplásticos. Dep. Ingeniería Mecánica. Universidad de Las Palmas de G.C. 1997.
- 53.- Francisco Javier Castany. Seminario de Inyección. T.I.I.P. Zaragoza. 1993.

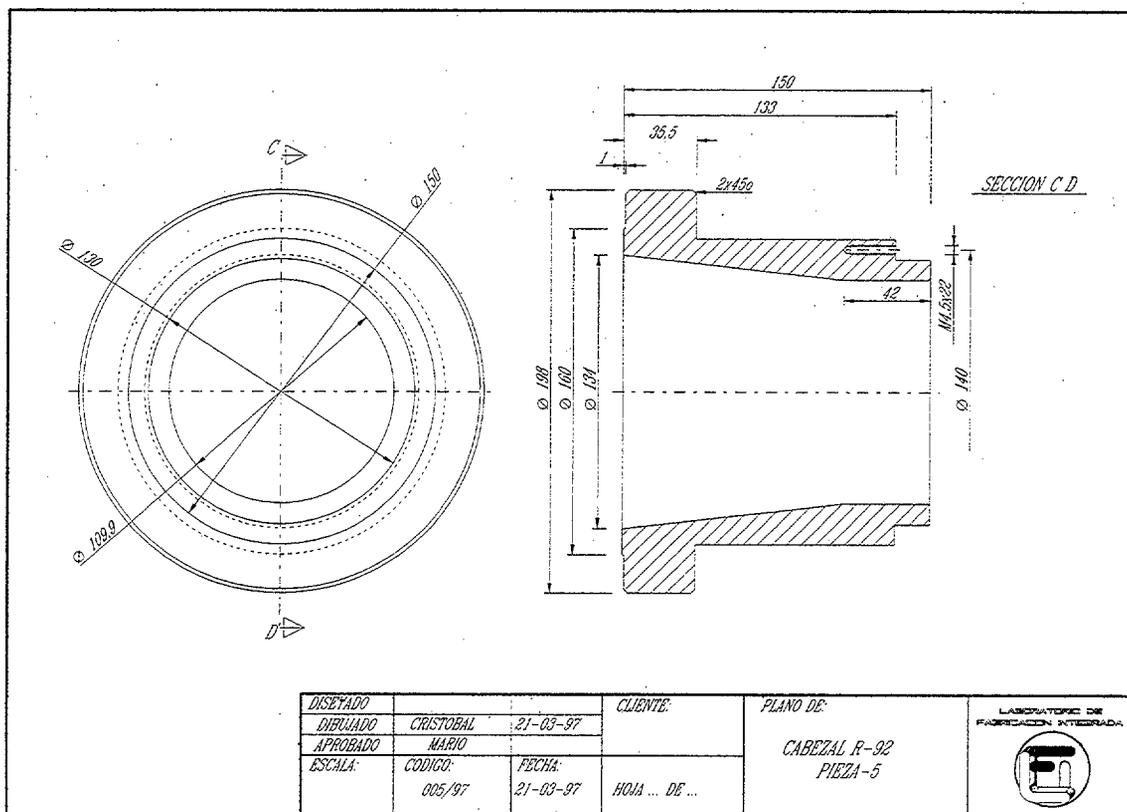
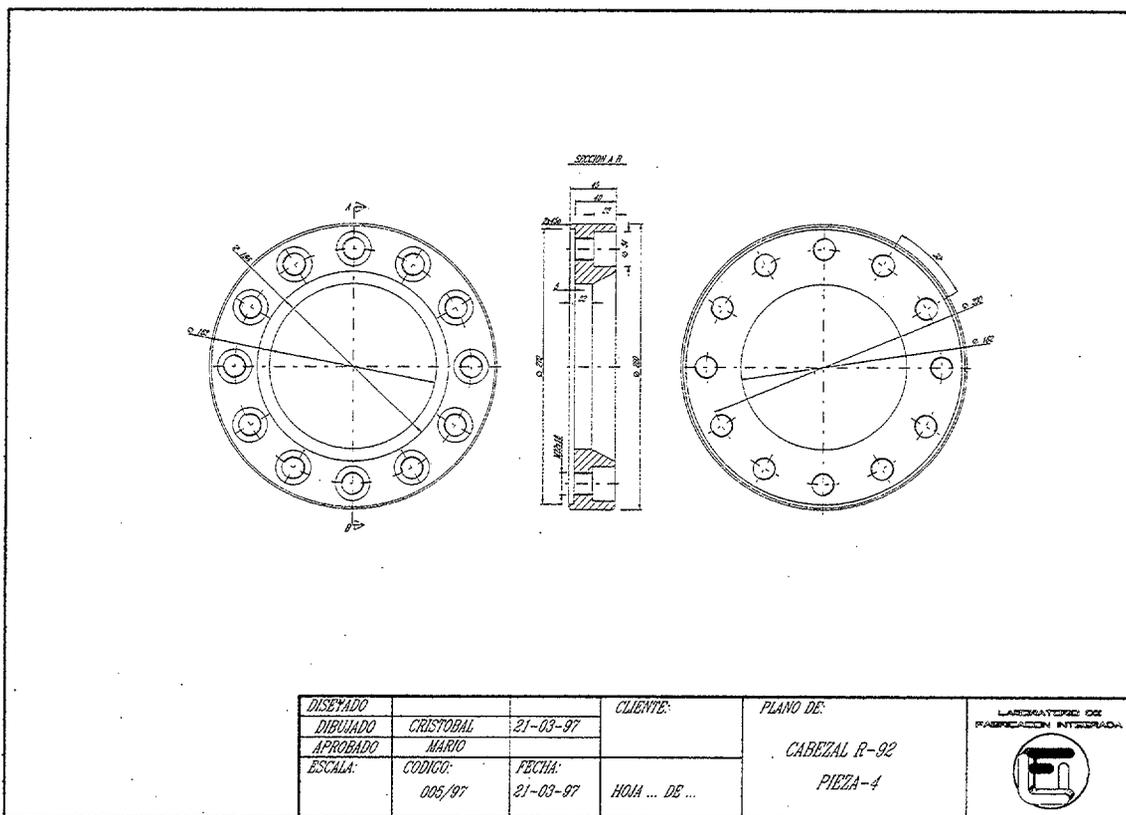
ANEXO A

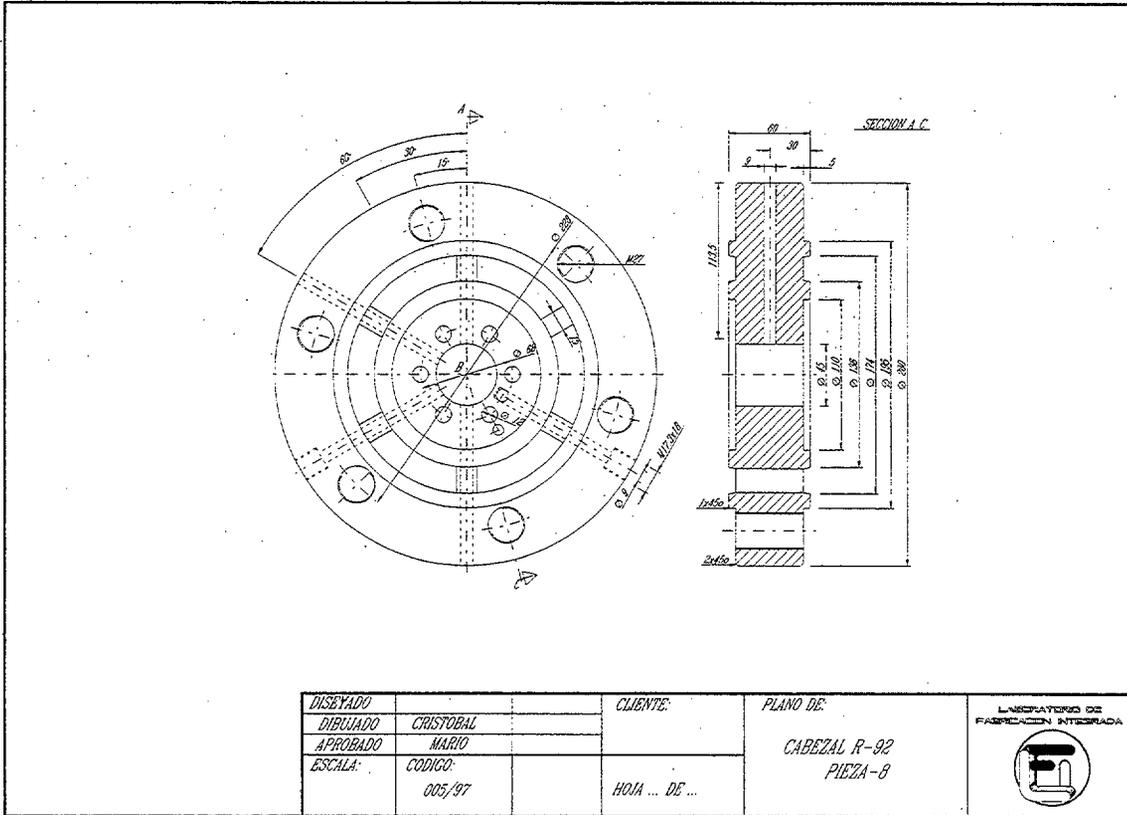
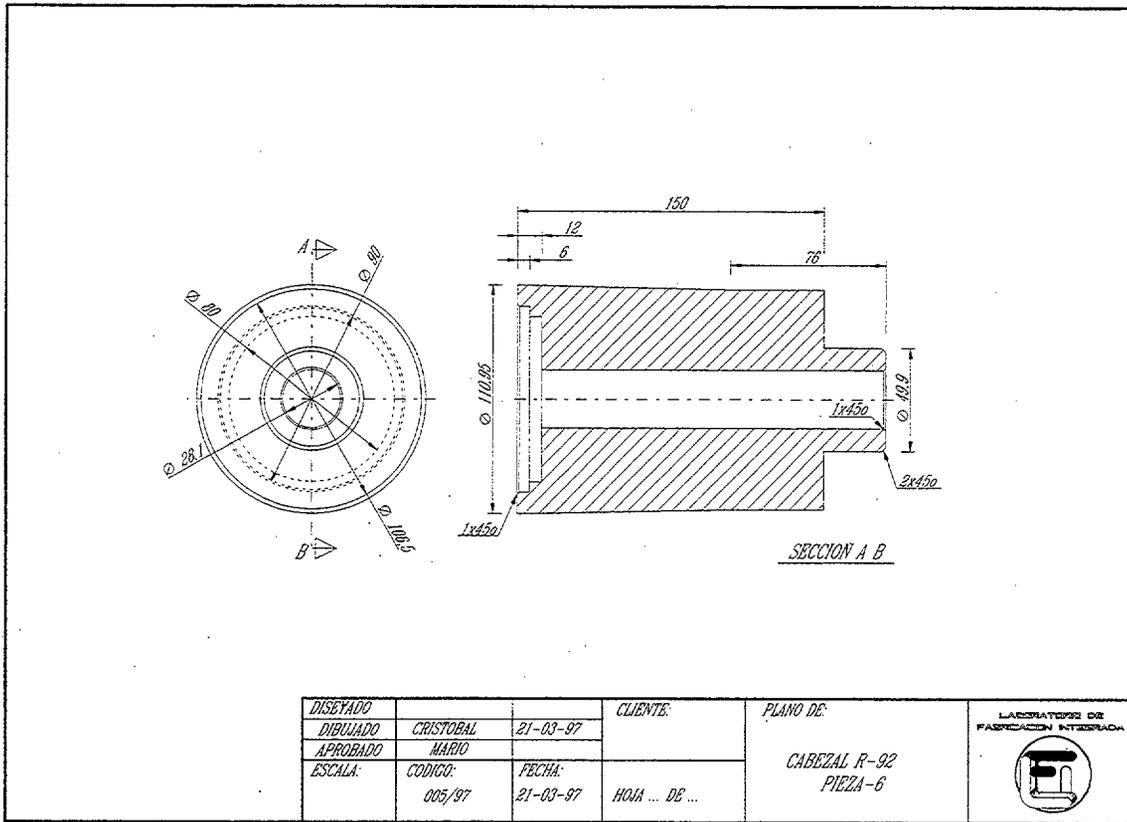
CABEZALES UTILIZADOS EN LA

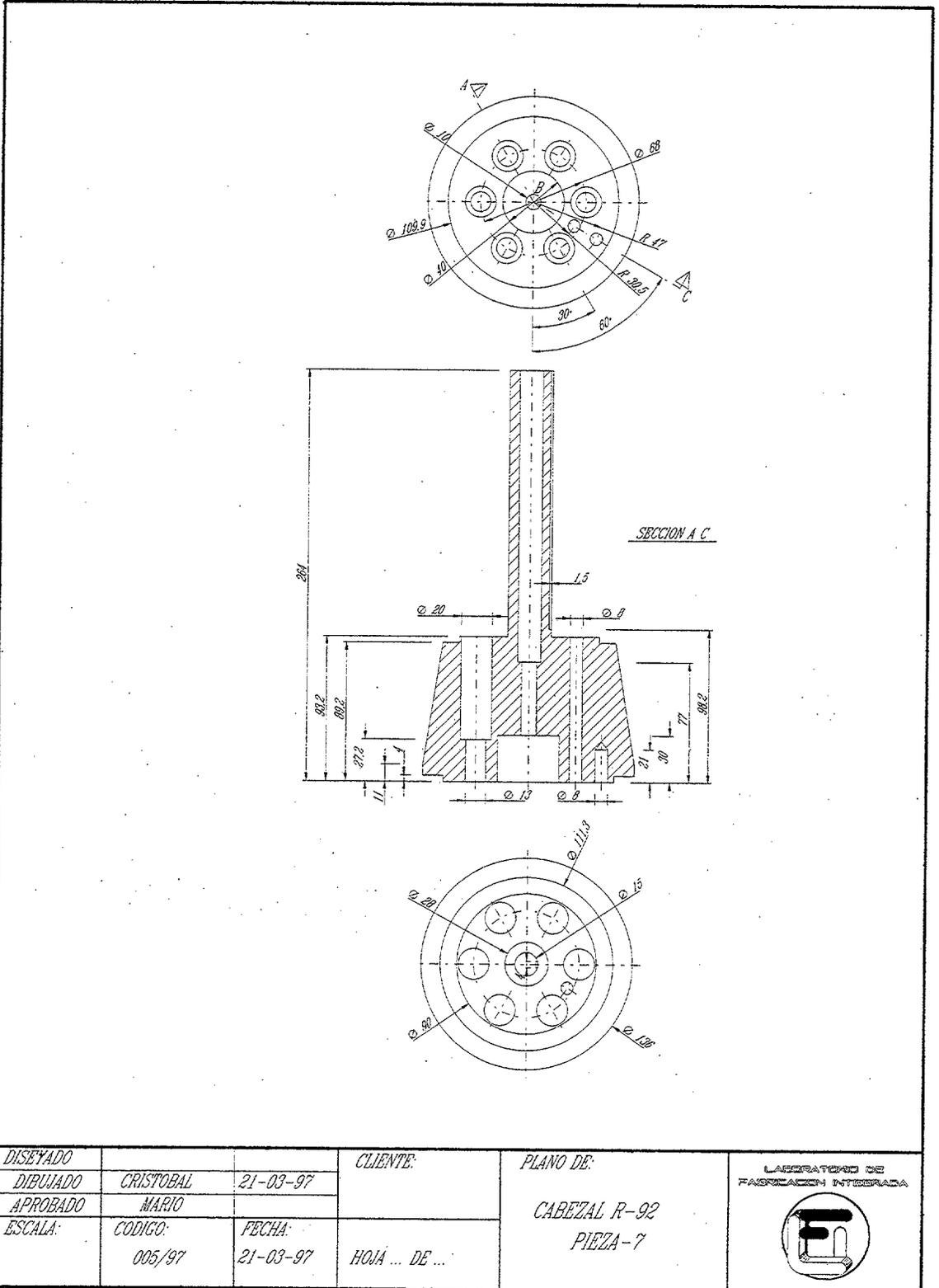
APLICACIÓN INDUSTRIAL

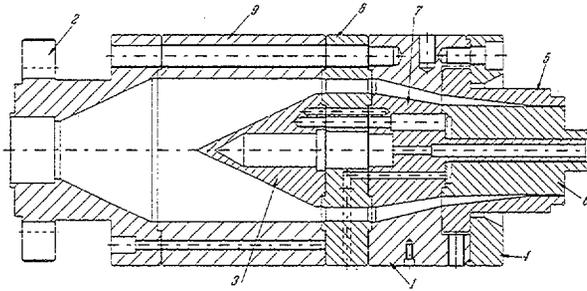






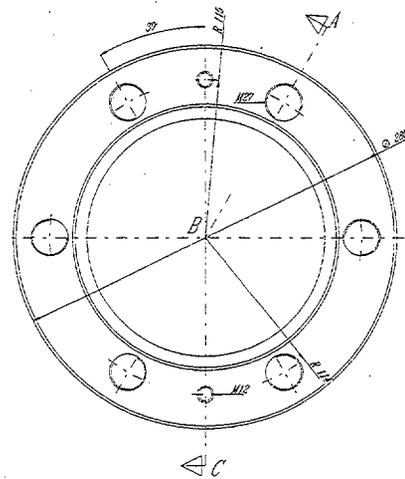
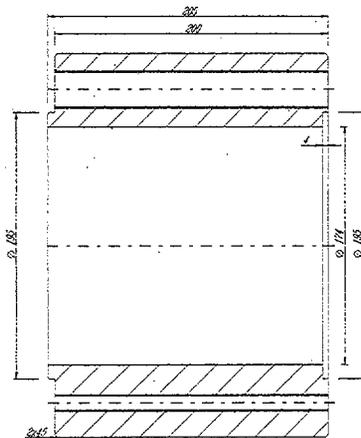




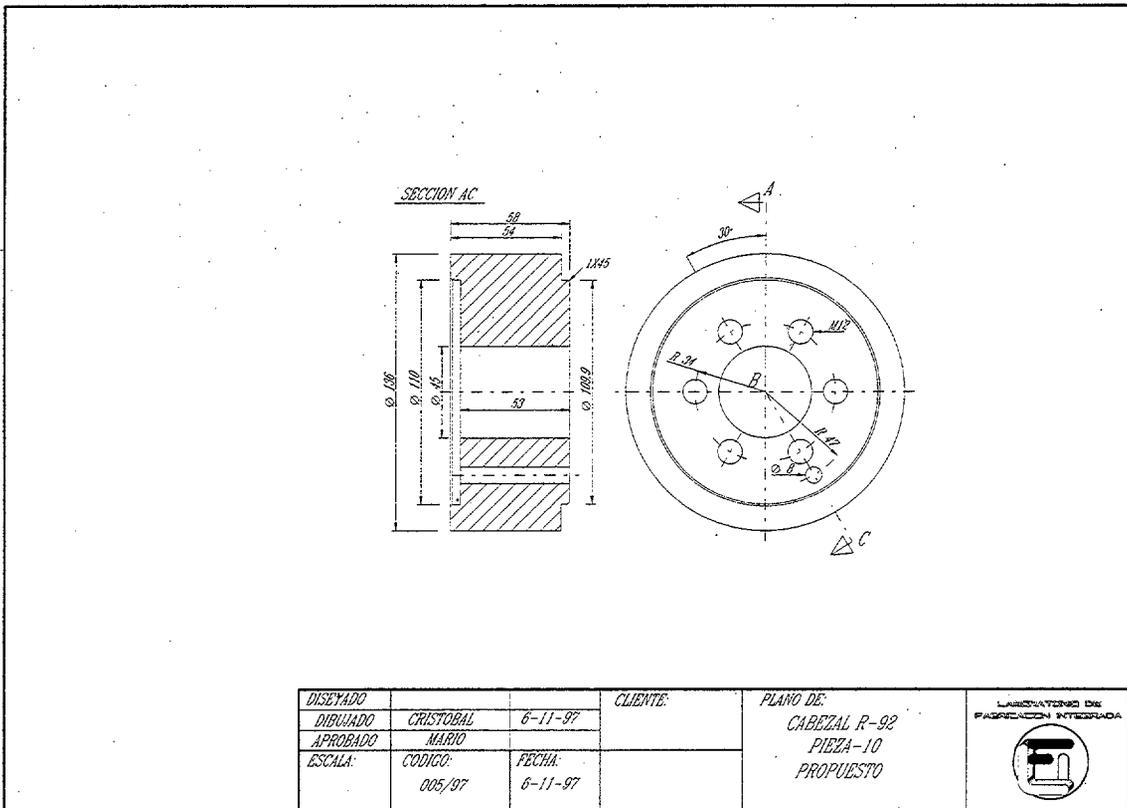
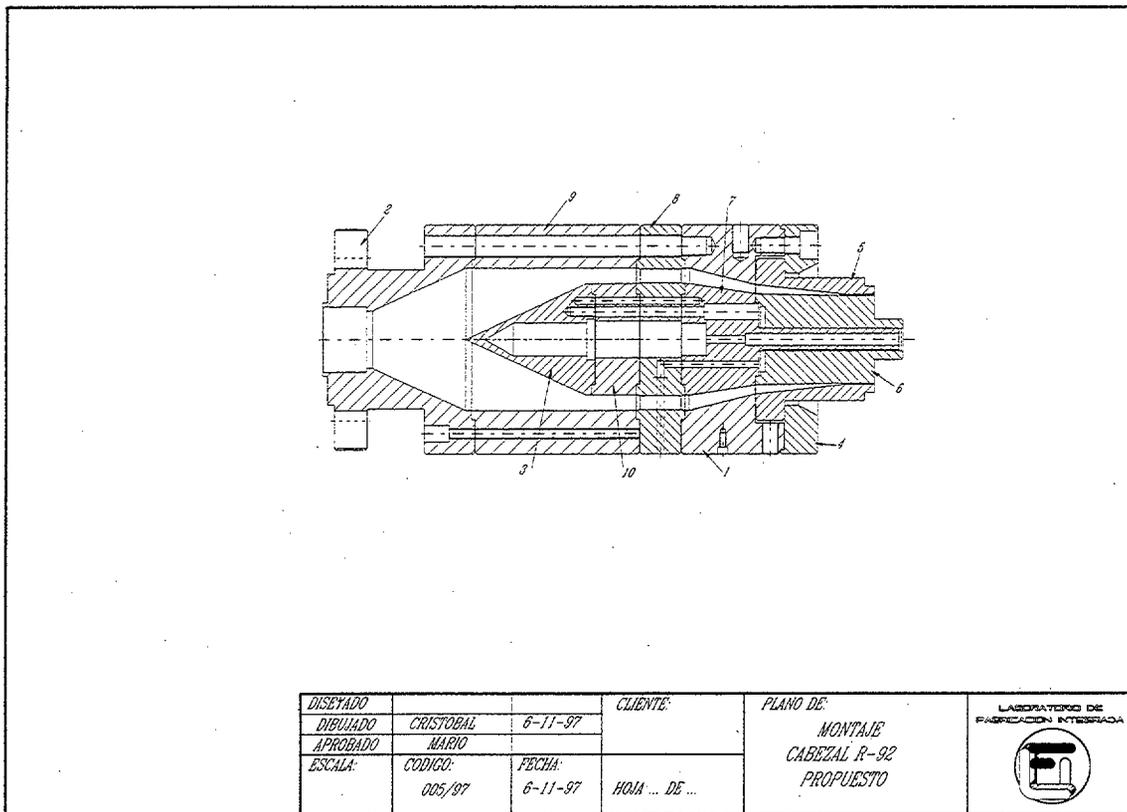


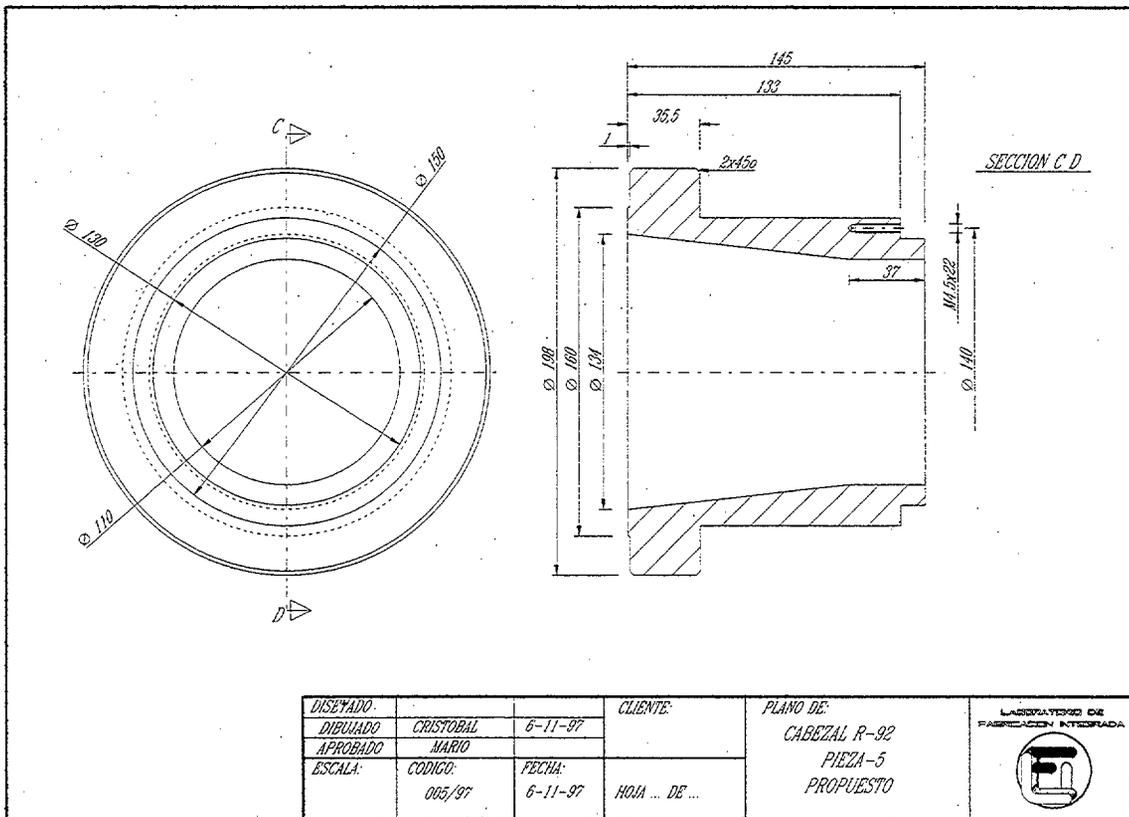
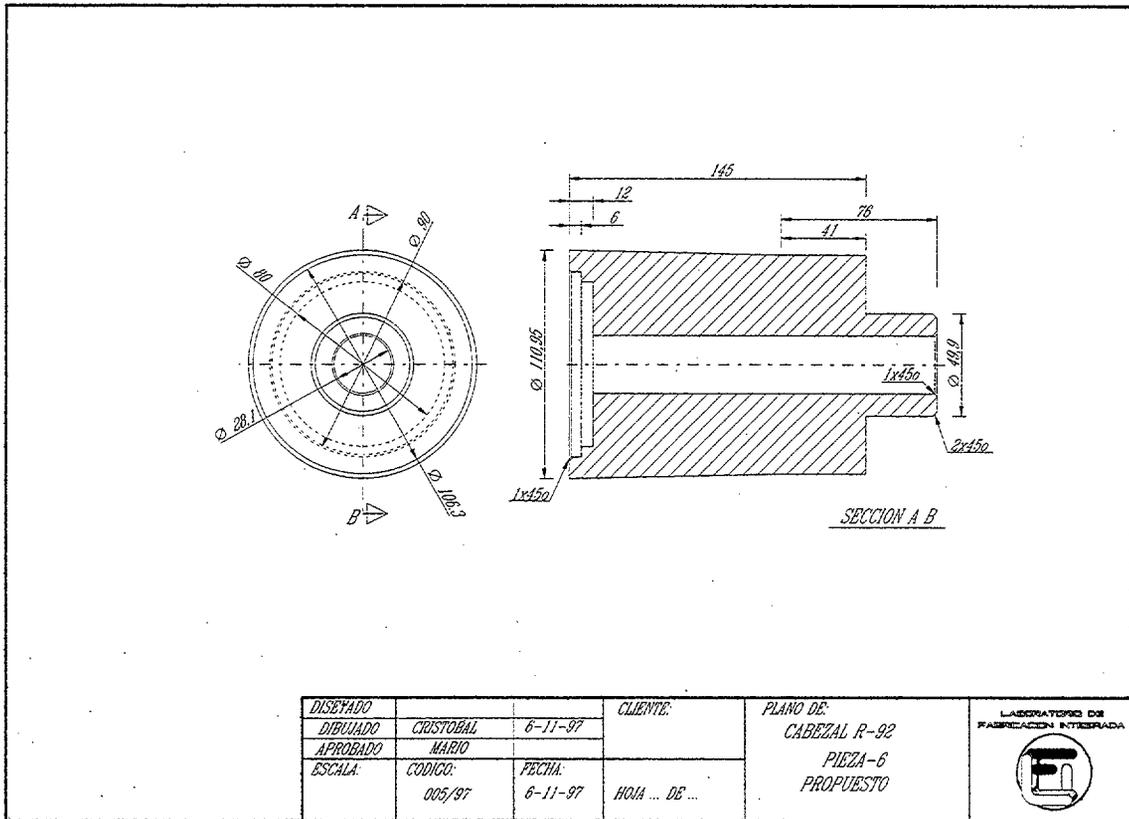
| | | | | | |
|----------|-----------|----------|-----------------|--------------|---|
| DISEÑADO | CRISTOBAL | 21-03-97 | CLIENTE: | PLANO DE: | LABORATORIO DE FABRICACION INTEGRADA  |
| DIBUJADO | MARIO | | | MONTAJE | |
| APROBADO | MARIO | | | CABEZAL R-92 | |
| ESCALA: | CODIGO: | FECHA: | HOJA ... DE ... | MODIFICADO | |
| | 005/97 | 21-03-97 | | (LARGO) | |

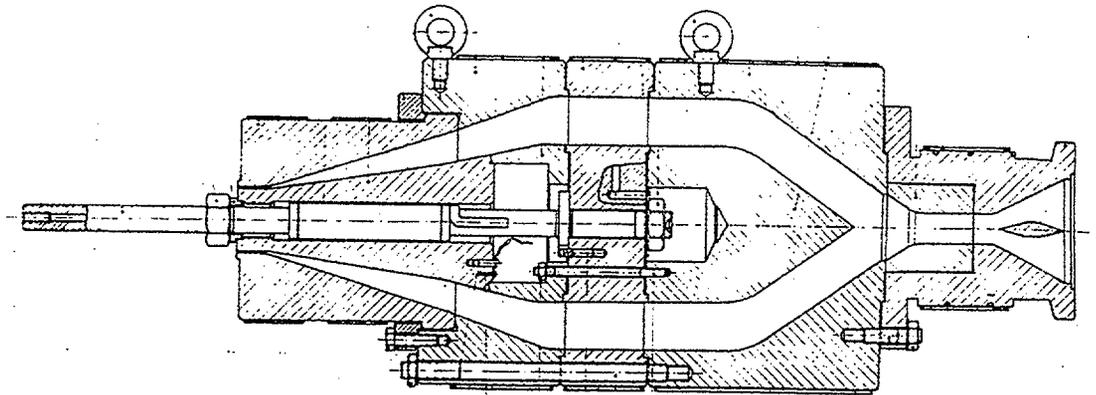
SECCION AC



| | | | | | |
|----------|-----------|----------|-----------------|--------------|---|
| DISEÑADO | CRISTOBAL | 21-03-97 | CLIENTE: | PLANO DE: | LABORATORIO DE FABRICACION INTEGRADA  |
| DIBUJADO | MARIO | | | CABEZAL R-92 | |
| APROBADO | MARIO | | | PIEZA-9 | |
| ESCALA: | CODIGO: | FECHA: | HOJA ... DE ... | MODIFICADO | |
| | 005/97 | 21-03-97 | | (LARGO) | |







Cabezal PH3 (URALITA)

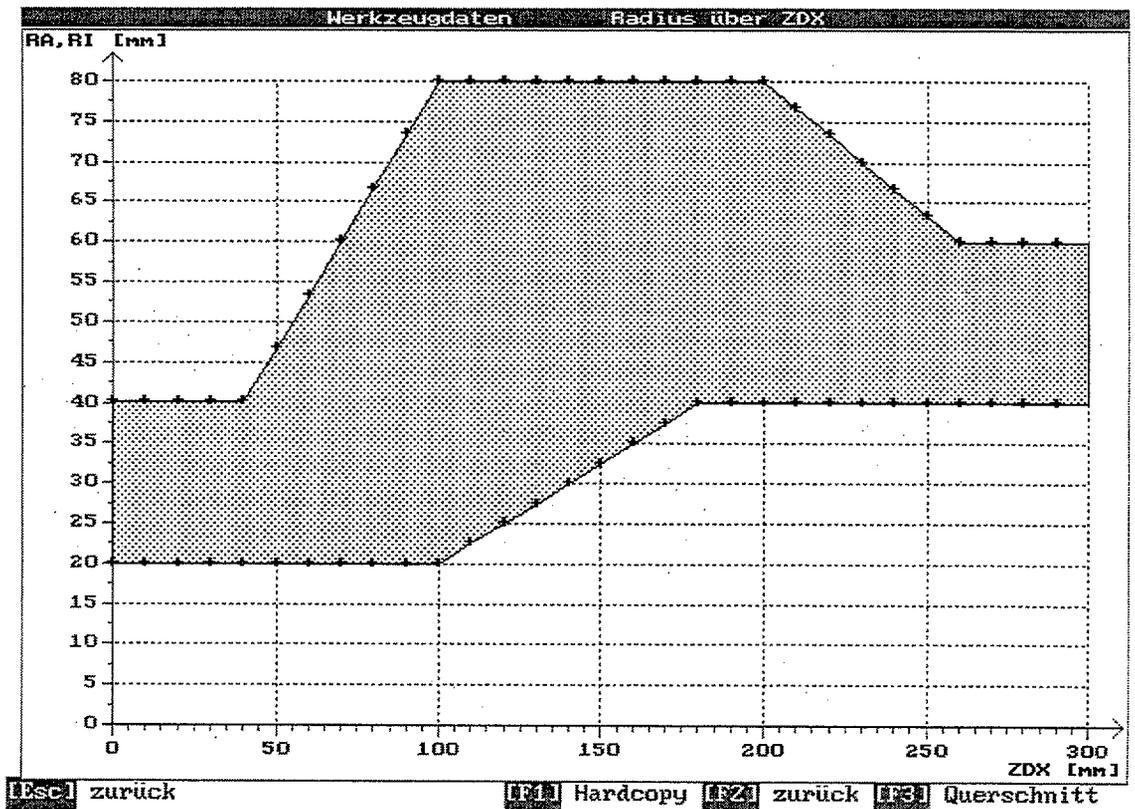
ANEXO B

**RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL
FLUJO A TRAVES DE UN CANAL
ANULAR OBTENIDOS POR EL
PROGRAMA DEFORM**

RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL FLUJO A TRAVES DE UN CANAL ANULAR OBTENIDOS POR EL PROGRAMA PROWEX (MÓDULO DEFORM) DESARROLLADO POR EL IKV (INSTITUT FÜR KUNTSTOFFVERARBEITUNG, AACHEN) Y QUE HAN SIDO COMPARADOS CON LOS DE DIEPLAST (BLOQUE III)

DEFORM 3.01 Demo

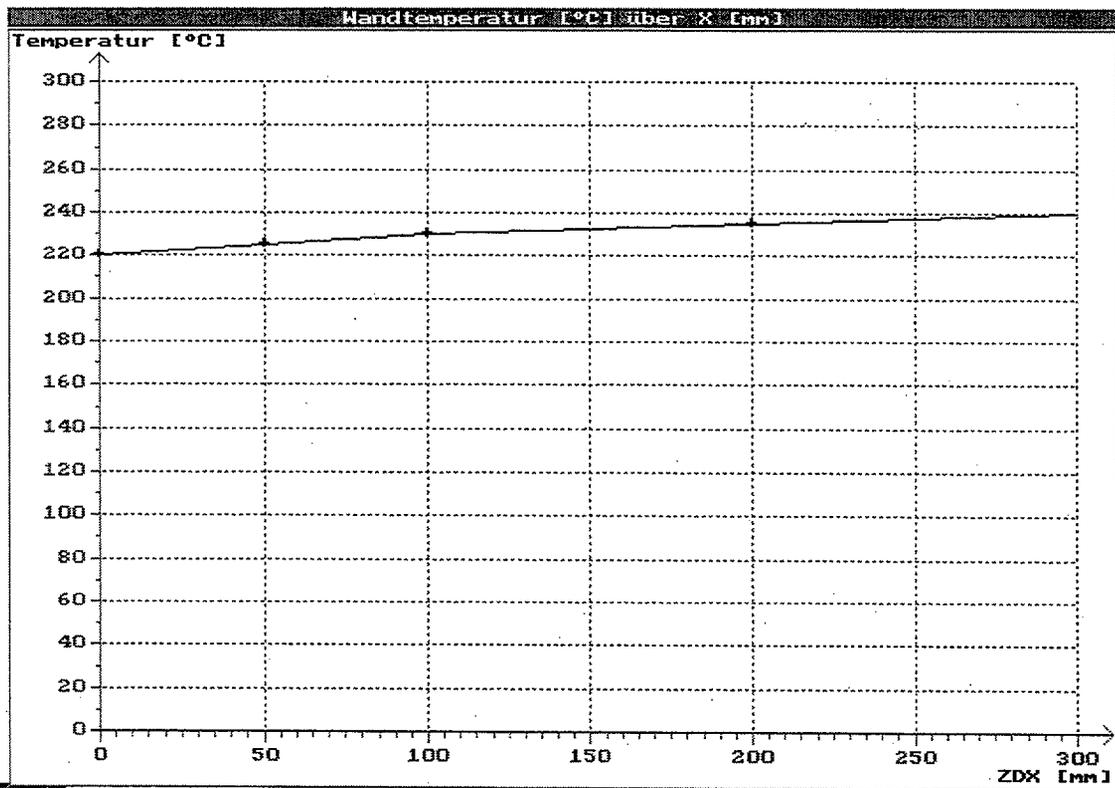
Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1



Geometría del canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

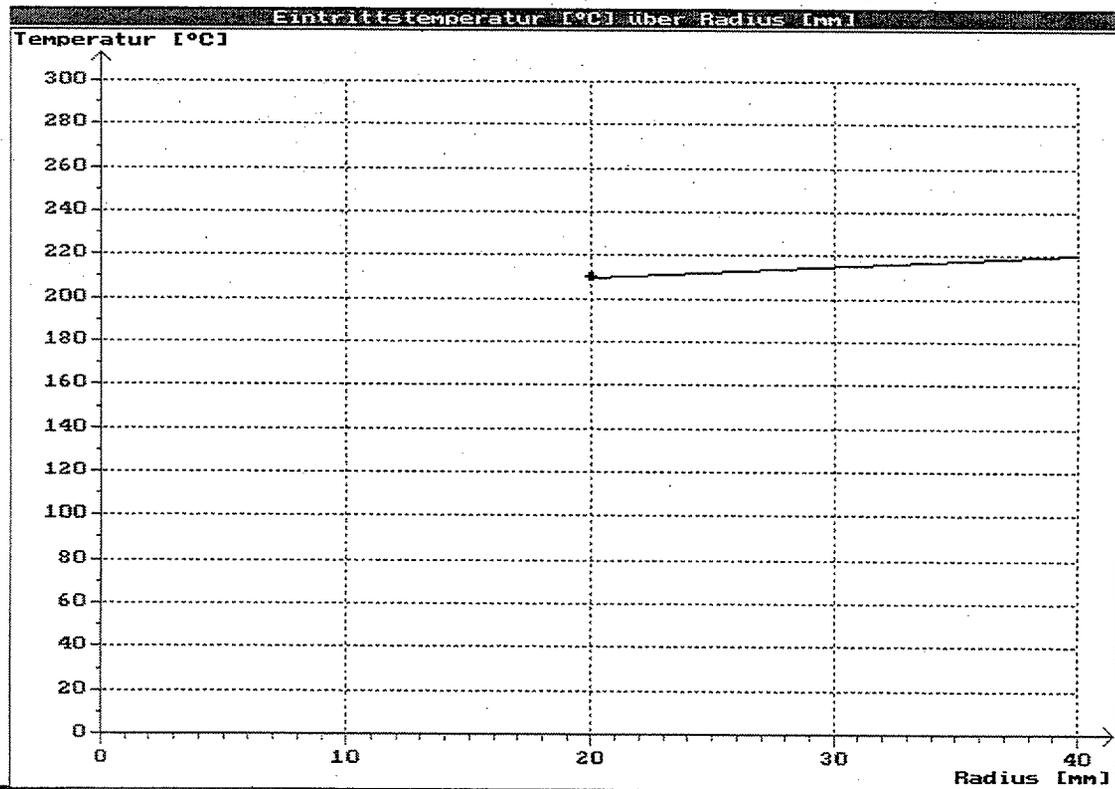


[Esc] zurück [F1] Hardcopy [F2] zurück

Evolución de la temperatura en pared exterior

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

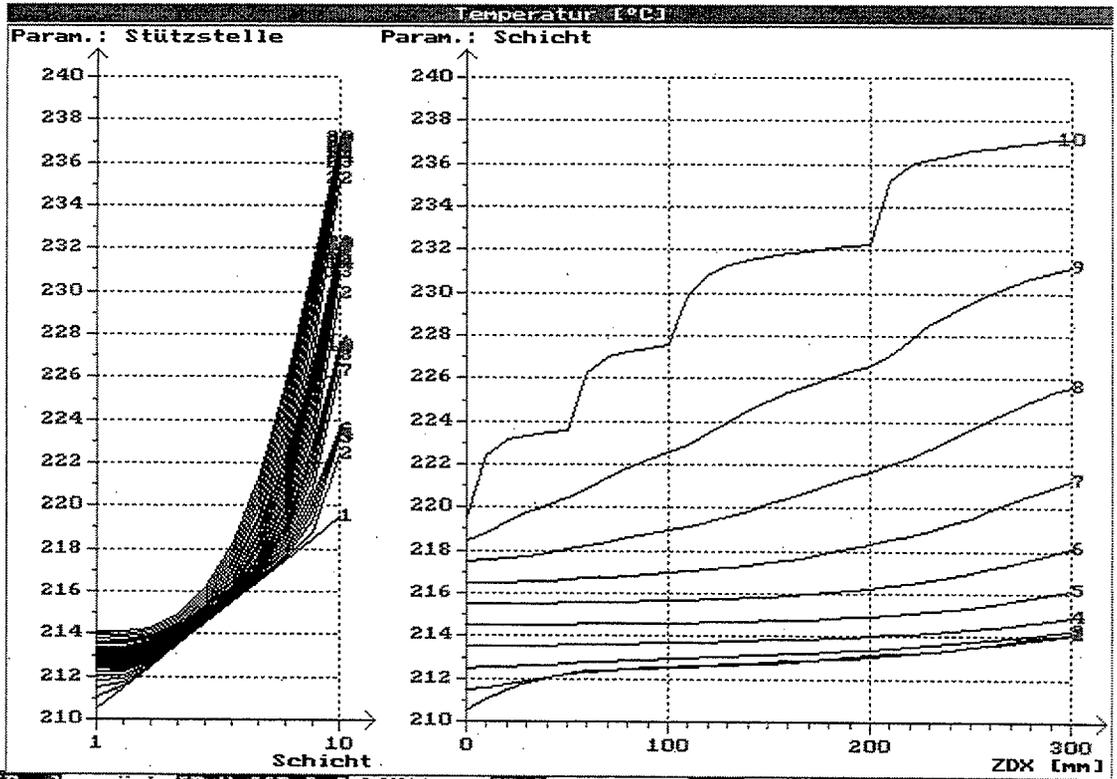


[Esc] zurück [F1] Hardcopy [F2] zurück

Evolución de la temperatura a la entrada

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

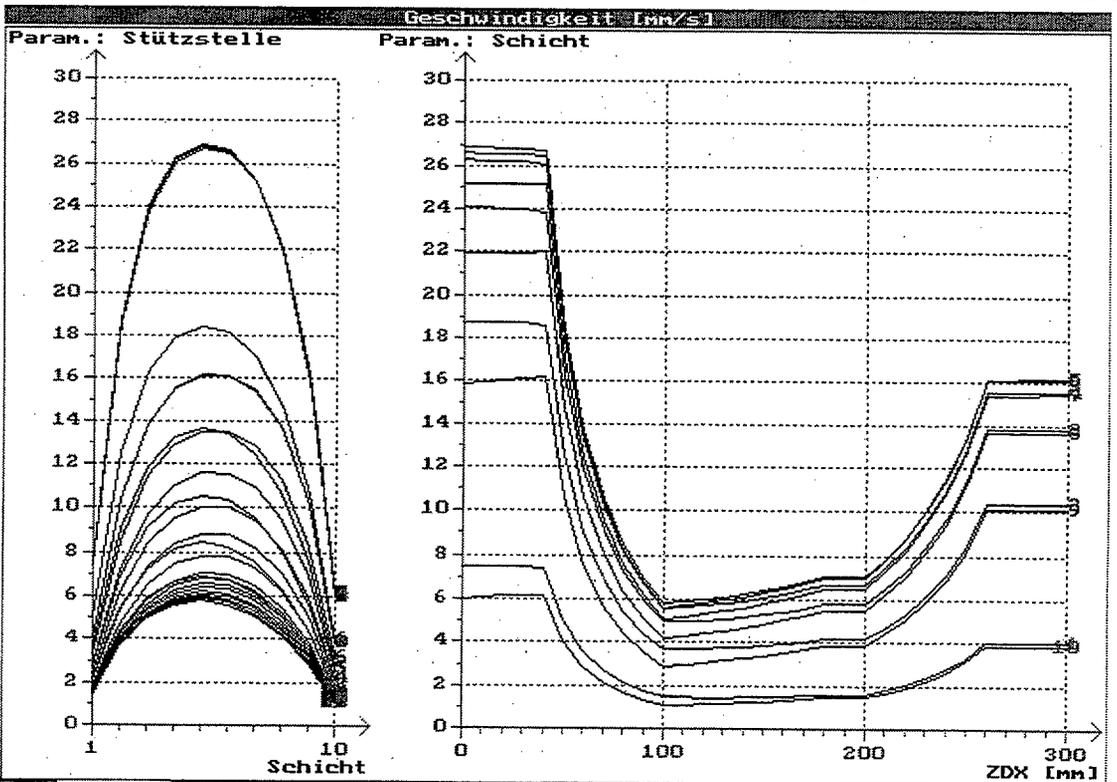


[Esc] zurück [PgUp][PgDn] blättern [F1] Hardcopy [F2] zurück

Temperaturas en la malla a lo largo de todo el canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

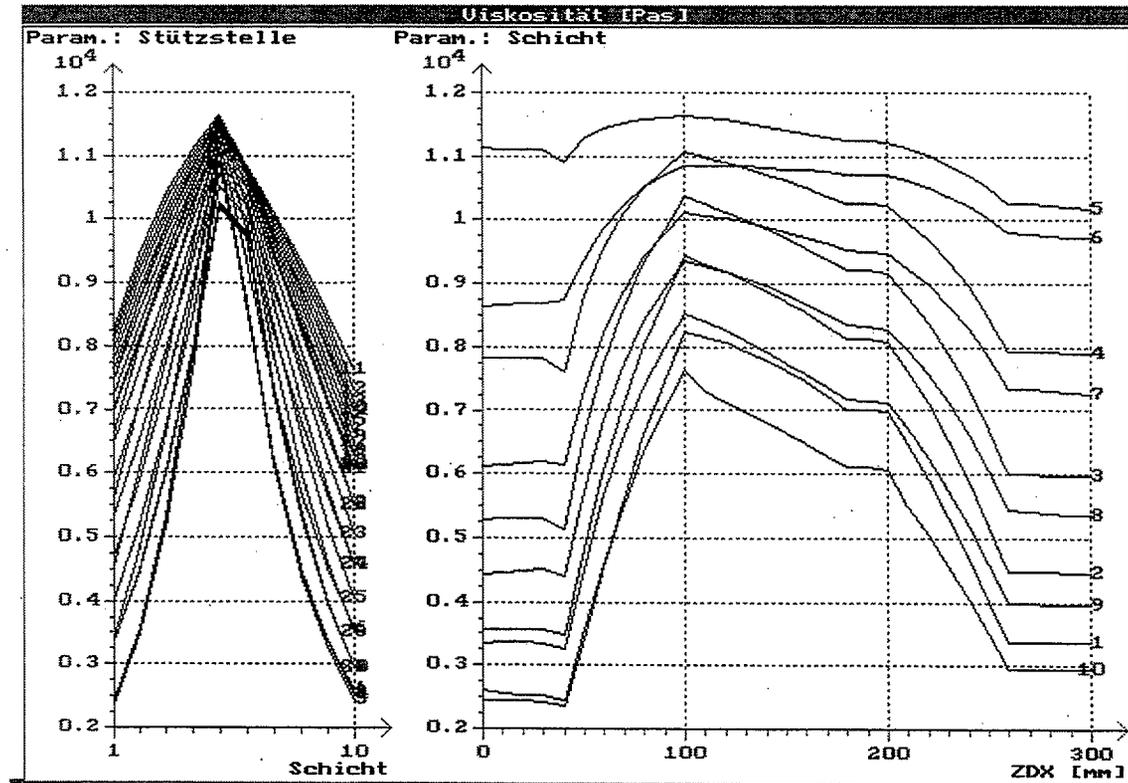


[Esc] zurück [PgUp][PgDn] blättern [F1] Hardcopy [F2] zurück

Velocidades en la malla a lo largo de todo el canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

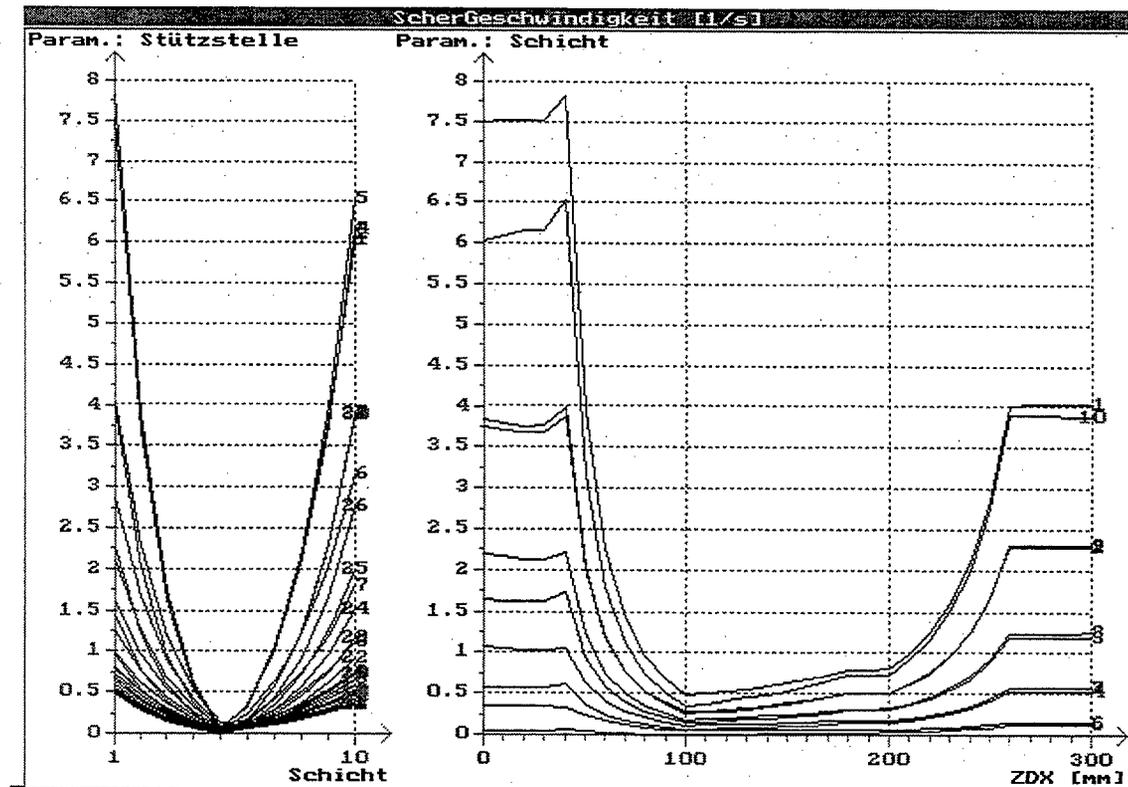


[Esc] zurück [PgUp][PgDn] blättern [F1] Hardcopy [F2] zurück

Viscosidad en la malla a lo largo de todo el canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

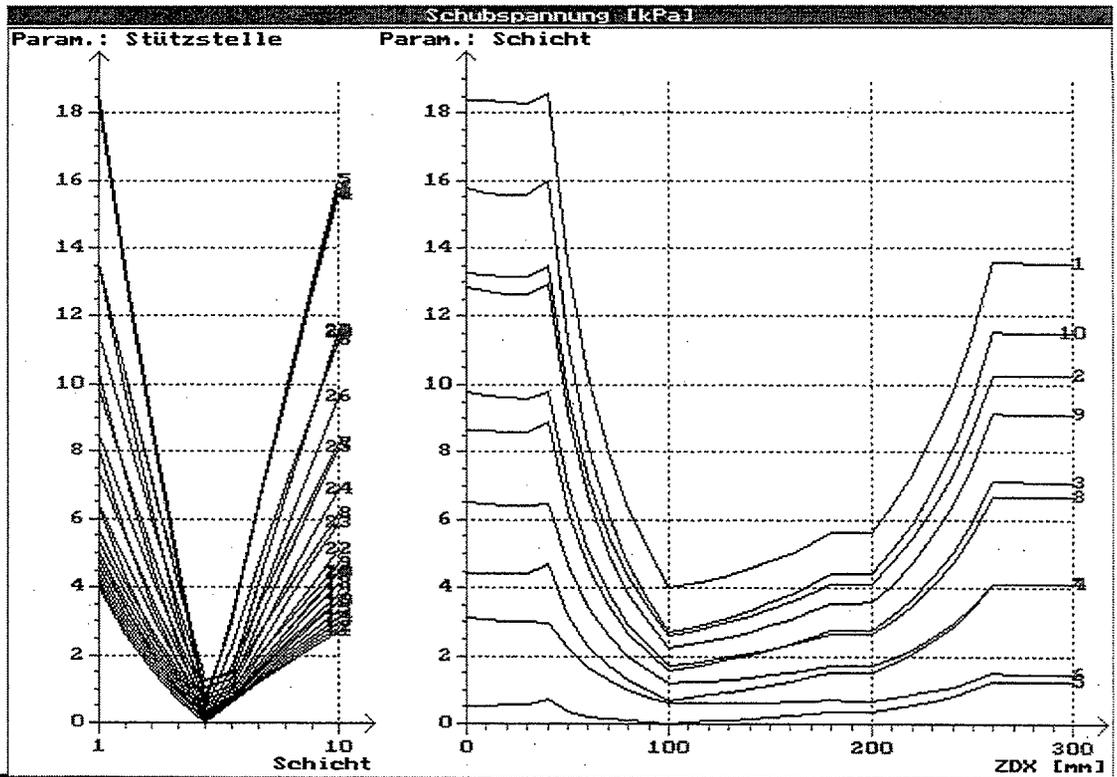


[Esc] zurück [PgUp][PgDn] blättern [F1] Hardcopy [F2] zurück

Velocidad de cizalla en la malla a lo largo de todo el canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1

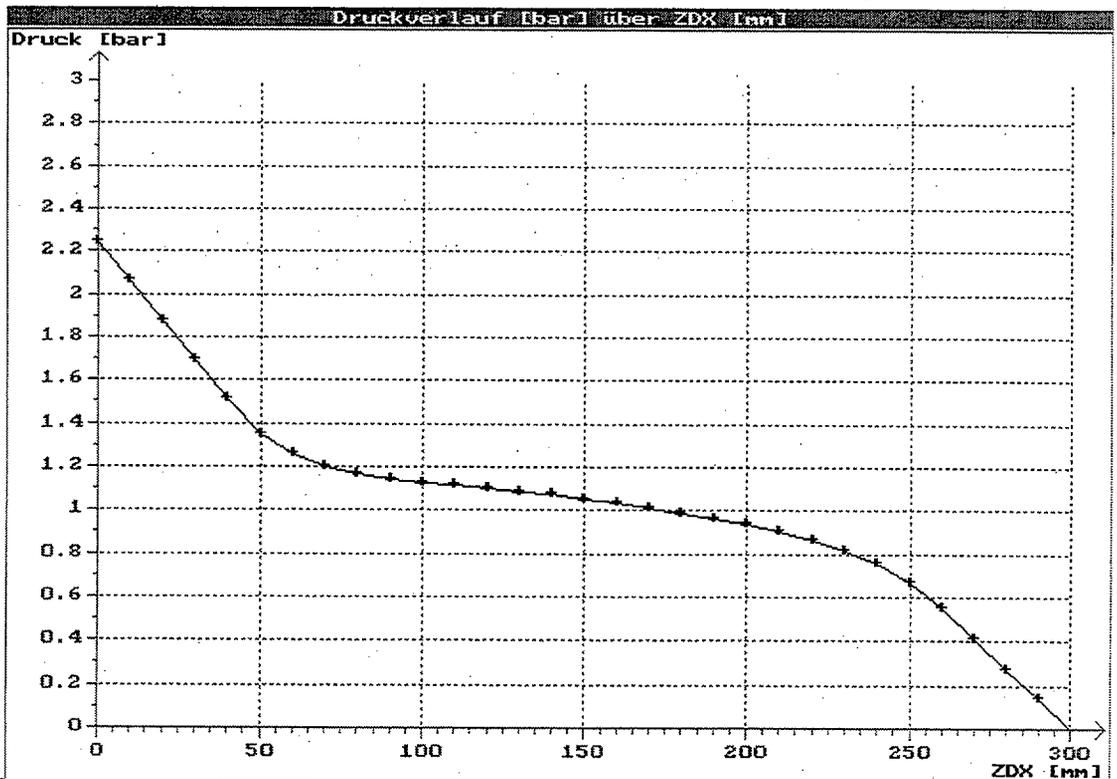


[Esc] zurück [PgUp][PgDn] blättern [F3] Hardcopy [F2] zurück

Tensión de cortadura en la malla a lo largo de todo el canal

DEFORM 3.01 Demo

Grafik zum Ergebnissatz : DEMO 1



[Esc] zurück [F3] Hardcopy [F2] zurück

Caída de presión a lo largo del canal

ANEXO C

LISTADO DE RUTINAS

PRINCIPALES QUE ANALIZAN EL

FLUJO A TRAVES DEL CABEZAL

RELACIÓN DE RUTINAS DE CÁLCULO PRINCIPALES QUE ANALIZAN EL PROCESO DE FLUJO

A continuación mostramos un listado de las subrutinas principales que han sido implementadas en DIEPLAST. Tan solo mencionamos las que calculan parámetros (velocidades, temperaturas, etc), no incluyéndose las que hacen referencia a definiciones geométricas, tratamiento de datos y resultados, representaciones gráficas, mallados, simulaciones, etc y en general todas aquellas asociadas a objetos utilizados en el programa que son innumerables. Los parámetros que calculan las siguientes subrutinas son los de carácter reológico (viscosidad, velocidad, velocidad de cizalla, tensión de cortadura, tiempo de residencia, temperatura, presión) y de carácter puramente viscoelástico (deformaciones reversibles, factores de hinchamiento, tensiones normales principales).

Método de viscosidades representativas.-

Canales de flujo

- *CALCUISO*. Subrutina principal de cálculo de parámetros para tramos de revolución.
- *PRESAN*. Cálculo de parámetros para tramos anulares.
- *PRESLLEN*. Cálculo de parámetros para tramos circulares.
- *CALCUISRE*. Subrutina principal de cálculo de parámetros para tramos tipo ranura
- *PRESREC*. Cálculo de parámetros para tramos tipo ranura.
- *REP*. Cálculo de viscosidad representativa en tramos de revolución.
- *REPSLIT*. Cálculo de viscosidad representativa en tramos tipo ranura.
- *FACFOR*. Cálculo de factores de forma.

Distribuidores

- *BRAZOS*. Cálculo de parámetros en soportes tipo araña.
- *RING*. Cálculo de parámetros en soportes de dos hileras de brazos.
- *HELICO*. Subrutina principal para análisis de distribuidores helicoidales.
- *ELEESP*. Definición de los elementos discretizados del distribuidor helicoidal.

- *CANALHELI*. Cálculo de parámetros en canales de entrada al distribuidor helicoidal.
- *CALCOAT*. Cálculo de parámetros en distribuidores tipo “Coathanger”.

Método numérico

- *PARAM*. Subrutina principal para cálculo de parámetros mediante métodos numéricos y condiciones no isotérmicas.
- *VELEN*. Cálculo iterativo de velocidades a la entrada del cabezal.
- *DERPRES*. Cálculo de $\Delta P / \Delta Z$ en cada sección.
- *CAMGRAD*. Cálculo de las velocidades de cizalla en los nodos de la malla para geometrías circular, anular y distribuidor tipo araña.
- *GRADMAX*. Cálculo de velocidad de cizalla máxima a la entrada del cabezal.
- *TEMPCIR*. Cálculo de temperaturas para geometrías circulares.
- *TEMPAN*. Cálculo de temperaturas para geometrías anulares.
- *TEMPREC*. Cálculo de temperaturas para tipo ranura y distribuidor tipo araña.
- *SAIANU*. Rutina para calcular el vector SA1(n) necesario para discretizar las ecuaciones integrales en geometrías anulares.
- *SAICIR*. Rutina para calcular el vector SA1(n) necesario para discretizar las ecuaciones integrales en geometrías circulares.
- *SAISP*. Rutina para calcular el vector SA1(n) necesario para discretizar las ecuaciones integrales en geometrías tipo ranura.
- *SBIG*. Rutina para calcular el vector SB1(k) necesario para discretizar las ecuaciones integrales en geometrías circulares y anulares.
- *SBISP*. Rutina para calcular el vector SA1(n) necesario para discretizar las ecuaciones integrales en geometrías tipo ranura o distribuidor tipo araña.
- *TIEMPO*. Cálculo de velocidades medias y tiempos medios de residencia.

Deformación del extrusado

- *DEFREV*. Cálculo de deformaciones reversibles longitudinales.
- *DEFREVCIR*. Cálculo de deformaciones reversibles circunferenciales.

- *RELAJACIÓN*. Cálculo de la evolución de las dimensiones del extrusado a la salida del cabezal para geometrías circulares, anulares y tipo ranura.
- *SWELL*. Valor de la deformación reversible media a la salida y determinación de los factores de hinchamiento.
- *TANNER*. Cálculo del factor de hinchamiento mediante el método de Tanner.