



**CENTRO POLITECNICO SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**



TESIS DOCTORAL

**METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACIÓN
REOLOGICA DE MATERIALES
TERMOPLÁSTICOS EN CONDICIONES NO
CONVENCIONALES PARA SU APLICACIÓN A
HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN:
APLICACIÓN A UN PEHD RECICLADO.**

Autor: LORENA PONZ ESTAÚN

Director: CARLOS JAVIERRE LARDIES

Diciembre, 2008.

*A Javi, por estar siempre a mi lado
A mis padres y Gloria por su apoyo incondicional
A mis familiares y amigos por su eterna comprensión*

*A todos mis compañeros del TIIP
A Javier por darme mi primera oportunidad
A Jorge por todo lo que de él he aprendido
A Carlos especialmente por su ayuda y dedicación*

*A todos los colaboradores de este trabajo
A todo aquel que alguna vez me ayudo
Gracias a todos*

INDICE

	<u>Pág.</u>
1. Introducción y objetivos.....	1
2. Estado del arte.....	5
3. Simulación del proceso de inyección.....	13
3.1.- Herramientas de simulación.....	15
3.2.- Caracterización reológica convencional.....	31
3.3.- Problemática.....	43
4. Metodología de caracterización reológica desarrollada.....	49
4.1.- Descripción de medios necesarios para la caracterización reológica.....	51
4.2.- Aplicación y ajuste de los medios necesarios.....	69
4.3.- Cálculo del modelo viscoso equivalente.....	79
4.4.- Aplicación informática.....	99
4.5.- Aplicación del método de caracterización a un polipropileno.....	111
4.6.- Aplicación del modelo viscoso equivalente calculado a los programas de simulación.....	117
5. Caracterización de la influencia del porcentaje de reciclado en las propiedades reológicas y mecánicas de un PEHD Aplicación de la metodología.....	127
5.1.- Caracterización reológica.....	129
5.1.1.- Trabajos previos.....	133
5.1.2.- Aplicación de la metodología a un material reciclado.....	153
5.1.2.1.- Descripción del material.....	155

5.1.2.2.- Aplicación de la metodología de caracterización al material reciclado.....	161
5.1.2.3.- Cálculo del modelo viscoso equivalente.....	171
5.1.2.4.- Aplicación a los programas de simulación.....	193
5.1.2.5.- Pruebas experimentales con los materiales analizados.....	217
5.1.2.6.- Análisis de resultados y conclusiones. Comparación de pruebas reales con simulación con los modelos calculados.....	237
5.1.3.- Análisis de la influencia del material reciclado en la viscosidad.....	253
5.1.3.1.- Análisis de resultados.....	255
5.1.3.2.- Comparación con la caracterización por reómetro.....	263
5.2.- Caracterización mecánica del material reciclado.....	277
6. Otras aplicaciones del método de caracterización.....	307
6.1.- Aplicación del método desarrollado a la sobreinyección.....	309
6.1.1.- Descripción del proceso de sobreinyección.....	315
6.1.2.- Simulación de la sobreinyección con los programas informáticos actuales.....	319
6.1.3.- Aplicación de la metodología a procesos de sobreinyección.....	323
6.1.4.- Cálculo del modelo viscoso de un proceso de sobreinyección con la metodología desarrollada.....	335
6.1.5.- Aplicación del modelo viscoso equivalente obtenido a los programas de simulación.....	341
6.1.6.- Análisis de resultados y conclusiones.....	353
6.2.- Aplicación a moldes texturizados.....	357
6.3.- Aplicación a geometrías complicadas de modelizar.....	359

7. Nuevo molde espiral.....	365
8. Conclusiones.....	391
9. Bibliografía.....	393

1.- INTRODUCCIÓN.

La tesis doctoral que se desarrolla a continuación se titula “METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS EN CONDICIONES NO CONVENCIONALES PARA SU APLICACIÓN A HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN. APLICACIÓN A UN PEHD RECICLADO” y ha sido dirigida por Carlos Javierre Lardiés profesor del Área de Ingeniería Mecánica. En esta tesis se muestra el resultado de cinco años de trabajo de investigación en el grupo T.I.I.P. – a.i.T.I.I.P. (Taller de Inyección de la Industria del Plástico, dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica del C.P.S. Universidad de Zaragoza y la Fundación Asociación para la Investigación del Taller de Inyección de la Industria del Plástico).

Esta tesis se centra en dos temas que tienen una fuerte relación; las herramientas de simulación del proceso de inyección y la caracterización reológica de termoplásticos.

Las herramientas de simulación del proceso de inyección, tipo MOLD-FLOW, son herramientas muy importantes para el diseño de componentes de plásticos inyectados. Mediante ellas se puede realizar la inyección virtual del molde y obtener una importante información que permite valorar aspectos tan importantes como la viabilidad de la pieza, los medios de fabricación necesarios y posibles defectos y dificultades técnicas que pueden aparecer en el futuro desarrollo del molde real. Actualmente estas herramientas permiten la introducción de numerosos datos y parámetros que definen tanto el molde a analizar, como el material termoplástico, como diferentes tipos de inyección, como los parámetros del proceso. El molde a analizar se define principalmente mediante la geometría de la pieza, sistemas de alimentación y refrigeración y el material o materiales con los que se va a fabricar. Dentro del proceso de inyección estas herramientas permiten introducir diferentes variables como la inyección secuencial, la inyección-compresión, coinyección, inyección bimatéria etc. El material viene caracterizado por numerosas propiedades, de las cuales destaca por su importancia para todos los resultados las curvas de comportamiento reológico obtenidas a partir de reómetros capilares y en la mayoría de los casos, proporcionadas por el propio fabricante.

Mediante las herramientas de simulación se pueden introducir los efectos de muchas variables y muchas condiciones de proceso, pero todavía hay muchas situaciones reales que no puede ser simuladas. Por ejemplo, el efecto sobre el flujo en piezas con acabados superficiales complicados, con diferentes texturas, el efecto de la introducción de materiales reciclados en diferentes porcentajes y con diferentes formas y tamaños de grano o los procesos de sobreinyección sobre telas y films en los que el material plástico fluye en contacto con elementos flexibles y con texturas diferentes a los materiales tradicionales para moldes, no son tenidos en cuenta de forma específica en las herramientas de simulación actuales. Este tipo de situaciones las denominaremos situaciones no convencionales. Numerosos trabajos se han realizado comparando los resultados de simulación con las pruebas de inyección reales para muy diversos materiales tanto con moldes de producción como con moldes experimentales, no es así para condiciones de inyección no convencionales.

Por otro lado un factor fundamental en el proceso de inyección y por tanto en la simulación del mismo es la caracterización reológica del material. Los materiales termoplásticos se pueden caracterizar mediante reómetros capilares, obteniéndose los valores de viscosidad para las temperaturas y velocidades de cizalla que sufrirán en el proceso de inyección. Otra forma de caracterización es mediante medios industriales utilizando moldes de ensayo, tipo molde espiral o máquinas con boquillas de inyección monitorizadas. Existen numerosos trabajos comparando los resultados obtenidos por unos u otros métodos, (Francisco Serraller, Daniel Mercado en sus respectivas tesis doctorales). Estos últimos métodos de caracterización con medios industriales no caracterizan el material, caracterizan el material en las condiciones reales de inyección, las variables que sobre la plastificación del material influyen y otros factores en función de los sensores que se utilice, el lugar donde estén colocados. Realmente caracterizan material, máquina y variables del proceso.

Teniendo en cuenta esta situación inicial se plantea el desarrollo de la presente tesis doctoral que inicialmente pretende cubrir los siguientes objetivos:

- El primer objetivo de esta tesis es el desarrollo de una metodología de trabajo para la caracterización reológica de materiales termoplásticos en condiciones no convencionales de cara a la utilización de estas características reológicas en herramientas de simulación del proceso de inyección. El método a desarrollar utilizará fundamentalmente para dicha caracterización un molde espiral y una máquina de inyección. La caracterización del material se podrá realizar con medios industriales con un coste muy reducido.
- Un segundo objetivo es la aplicación de la metodología que se desarrolle en la caracterización y posterior simulación de un polietileno de alta densidad reciclado, utilizado en la fabricación de grandes contenedores. En este proceso se trabajará con diferentes porcentajes de material reciclado para analizar su influencia en el comportamiento viscoso y con un material reciclado con la misma forma y tamaño como el que se utiliza actualmente en la fabricación de estos contenedores.
- Un tercer objetivo es plantear la posibilidad de la aplicación del método y la utilización de los modelos viscosos que de él se obtienen en herramientas de simulación en otras situaciones no convencionales como pueden ser los procesos sobreinyección de films o láminas con diferentes características, inyección de piezas con texturas y acabados superficiales de difícil modelización o geometrías complejas.

Para la consecución de estos objetivos se desarrollarán los siguientes apartados:

Apartado 1, 2 y 3.

En el apartado 1 se ha hecho una breve introducción a la materia sobre la que va a versar este trabajo y se van a plantear los objetivos que se pretenden alcanzar. En el apartado 2 se va a describir el estado de la materia a fecha de inicio del trabajo y en el apartado 3 se va a hacer una introducción al trabajo con los programas de simulación.

Apartado 4: Metodología de caracterización desarrollada.

En este punto se va a presentar la metodología desarrollada presentando los medios necesarios para aplicarla, las fases de las que consta, los rangos de validez de los parámetros que se utilizan y se muestra un ejemplo de la aplicación de la misma.

Apartado 5: Caracterización de la influencia del porcentaje de reciclado en las propiedades reológicas y mecánicas de un PEHD. Aplicación de la metodología

La metodología desarrollada se va a mostrar aplicada sobre un tipo de material no convencional, sobre un polietileno de alta densidad mezclado con el mismo material reciclado en diferentes porcentajes. El material reciclado proviene del reciclado de grandes contenedores, molidos con un molino que genera material reciclado con un tamaño de grano muy grande en comparación al material virgen. Este tamaño y la irregularidad tanto del tamaño y de la forma, se sabe de forma experimental, que influye tanto en la pieza como en el proceso de inyección.

Apartado 6: Otras aplicaciones.

El trabajo realizado termina con un apartado donde se muestra la aplicación de la metodología en otro proceso de inyección de termoplásticos y se propone su aplicación en otras situaciones no convencionales de geometrías de piezas de inyección. Se plantea además un nuevo diseño de molde experimental de cara a la aplicación óptima del método de caracterización con una versión simplificada para hacer viable, técnica y económicamente, la caracterización de materiales en una pequeña o mediana empresa.

2.- ESTADO DEL ARTE

Durante el SXX, el estudio a cerca de los materiales plásticos tanto de sus propiedades como de sus procesos de transformación, ha sido un tema de estudio e investigación recurrente. La causa ha sido el gran interés que han despertado este tipo de materiales en la industria, debido a la variedad de tipos de materiales con diferentes características, a su fácil y rápida transformación y manipulación, a su versatilidad para la creación de geometrías diferentes, y sobre todo, a coste final que implica la producción de cada pieza.

Todas estas razones han impulsado de manera creciente a lo largo de los años, el estudio y desarrollo de todos aquellos aspectos que influyen sobre los termoplásticos y su proceso de producción, con el objetivo de aumentar el conocimiento sobre estos materiales y mejorar e innovar en los procesos de producción.

En los últimos años el desarrollo de nuevos acabados, geometrías cada vez más complejas y de nuevas mezclas de materiales está revolucionando el sector de la producción y transformación de plásticos. Esto provoca que en algunos casos los sistemas actuales que se utilizan para la caracterización de materiales o simulación de procesos de inyección no sean útiles para reproducir de forma fiable el proceso.

Durante el desarrollo de esta tesis se va a trabajar sobre la caracterización de materiales termoplásticos en situaciones no convencionales mediante procedimientos industriales y sobre la utilización de los datos obtenidos tras la caracterización para poder posteriormente ser utilizados en procesos de simulación. Este trabajo tiene como base y aprovecha el esfuerzo de otros investigadores que han trabajado sobre este tema.

MOLDE ESPIRAL

Muchos autores han trabajado con el molde espiral con el fin de evaluar la diferencia de fluidez y densidad entre dos o más materiales. Estudios acerca de como diferentes valores de viscosidad provocan diferentes longitudes de flujo para condiciones de geometría, presión y temperatura constantes, y de cómo poder predecir longitudes de flujo en función del material y de las condiciones de proceso.

HIEBER [2], utilizan el molde espiral para analizar la influencia de la variación de la densidad en la longitud de flujo que se observa en el molde espiral tras analizar distintos materiales y bajo distintas condiciones de proceso. Los ensayos los realiza utilizando únicamente los controles de presión y temperatura que ofrece la máquina de inyección y en el estudio compagina resultados de simulación y de inyección experimental. Los resultados que presenta son comparaciones entre poliestireno y policarbonato.

RAO [4], desarrolla un modelo semi-empírico que permite predecir la longitud de flujo de diferentes materiales termoplásticos en un molde espiral, reduciendo así el número de ensayos experimentales a realizar. Asume flujo no Newtoniano y el modelo que desarrolla contempla todos los parámetros de los que depende la longitud de flujo de un material; viscosidad del polímero, temperatura del material y del molde, distribución de velocidades en la sección de la espiral, presión de inyección y geometría del molde.

WHALEN [5], ensaya diferentes concentraciones y tamaños de resina reciclada mezclada con resina virgen en el molde espiral para comprobar; la validez de las muestras en inyección bajo diferentes condiciones de proceso y la flexibilidad, tensión y fuerza dieléctrica de las espirales inyectadas

XU [6], analiza la influencia de la reología del material, la temperatura y la velocidad de inyección en las marcas de flujo que aparecen en las piezas inyectadas. Para realizar los ensayos utiliza un molde espiral sobre el que experimenta la influencia de cada uno de los parámetros objeto de estudio.

El molde espiral también ha sido un instrumento utilizado en la determinación de valores de viscosidad. HIEBER [1], utiliza el molde espiral para la obtención de las constantes que definen el modelo viscoso mediante un método iterativo, a través de la comparación de las longitudes que se obtienen en simulación y en ensayos experimentales para un material con el molde espiral. Posteriormente compara los valores de viscosidad calculados con el modelo viscoso obtenido con el método iterativo desarrollado con los valores de viscosidad resultantes del ensayo con un reómetro capilar.

Otros autores como LEBLANC [3], MERCADO [7] y SERRALLER [9], dotan el molde espiral con sensores de presión. Esto permite evaluar las variaciones de presión en el interior de la cavidad del molde en función del material utilizado en los ensayos de inyección y en función de las condiciones de proceso como presión, temperatura y velocidad de inyección impuestas, obtiene las curvas de flujo de los distintos materiales que analizan cada uno de ellos.

Durante el desarrollo de la tesis se ha conocido el trabajo que esta desarrollando un grupo de investigación austriaco en la Universidad de Leoben también desarrollando un molde que permita la caracterización de materiales plásticos bajo condiciones de proceso industriales. Es un molde calefactado, aislado térmicamente de la máquina de inyección por medio de una placa de aislamiento, y el caudal de material que se inyecta se determina a través de un pistón dotado con un sensor de posición colocado al final de la zona de captación de datos. Esta dotado con cuatro sensores de presión, un sensor de temperatura por infrarrojos para la determinación de la temperatura del material y un sensor de temperatura de molde. Es un molde con un alto nivel de monitorización y un coste sobre los 42.000 euros. En este molde se trabaja sobre un elemento tira donde el material permanece continuamente fundido a la temperatura programada y donde se calcula la viscosidad a partir de la caída de presión entre sensores. El molde trabaja con un programa informático para ayudar a la transformación y análisis de los datos que se registran.

CARACTERIZACIÓN EN BOQUILLA

A partir de las necesidades del mercado, que demanda nuevos métodos de caracterización que se adapten a las novedades en materiales y procesos de inyección que se van desarrollando, autores han trabajado en el desarrollo de nuevos métodos de caracterización de materiales por medios industriales, a través de la incorporación de sensores de presión en boquillas de inyección diseñadas especialmente para este fin [10].

FERNANDEZ [11], utiliza medios industriales “complejos” para realizar la caracterización de materiales reciclados o recuperados ya que los métodos de caracterización de laboratorio no se consideran adecuados para este tipo de materiales. Trabaja con diferentes secciones de boquilla, con las que calcula viscosidades aparentes, y los mejores resultados los obtienen con una boquilla plana de 3x20mm.

CARACTERIZACIÓN EN EXTRUSORA

Se han desarrollado otros métodos para la caracterización de materiales plásticos mediante procesos industriales a través de otras máquinas de transformación de plásticos, como en este caso, a través de una extrusora.

LÉONARDI [12], utiliza para la caracterización de materiales plásticos una máquina de extrusión. Durante el proceso de extrusión la temperatura es controlada por los termopares del husillo de la máquina, la presión que ejerce la máquina y la velocidad de extrusión se va modificando conforme avanza el ensayo, por lo que en un mismo ensayo se caracteriza el material bajo distintas condiciones de proceso, o lo que es lo mismo, bajo distintos shear rate. Para la obtención del caudal de extrusión de la máquina para cada una de las velocidades ensayadas se controla con un peso la masa del material extruido en función del tiempo transcurrido del ensayo, por lo que luego se puede relacionar fácilmente la velocidad del ensayo con el caudal de material extruido.

En todos los casos analizados donde se utilizan medios industriales para la caracterización del material los valores de shear rate están limitados por la sección de paso de trabajo y el caudal que pueden suministrar dichos medios.

MATERIALES RECICLADOS

En las últimas décadas, el tema del reciclaje de materiales y elementos está cobrando una gran importancia y todavía más en los últimos años en los que se está regulado legalmente el reciclaje de plásticos.

Las industrias de transformación de plásticos han reciclado siempre las piezas defectuosas por cuestiones de reutilización de materiales y reducción de costes de producción, aunque siempre con limitaciones, ya que han observado que la calidad estética y resistencia mecánica de las piezas obtenidas con un porcentaje de material reciclado no siempre se mantiene con respecto a la calidad de las piezas obtenidas con material virgen.

Muchos autores han dedicado estudios al conocimiento del material reciclado, como varían sus propiedades respecto al material virgen, ya que en la producción de piezas críticas con responsabilidad mecánica, la introducción de material reciclado puede ser gravemente perjudicial.

HOFFMAN [13], trabaja con resinas fenólicas y analiza como afecta a las propiedades mecánicas, longitud de flujo y tiempo de cura, la introducción de tres porcentajes distintos de material reciclado al material virgen y la introducción de tamaños de partículas recicladas diferentes, con un reómetro. Observa que el tiempo de curación se reduce y que la viscosidad de la mezcla aumenta al aumentar el porcentaje de material reciclado y al aumentar el tamaño de partícula de material reciclado

SCRIVEN [14] estudia la cantidad de material reciclado que puede ser añadido para la producción de dos piezas concretas con poliamida 6.6, sin que por ello se vea afectada la calidad funcional de las mismas. Para ello analiza seis porcentajes de material reciclado distintos, utilizando reciclado de primera generación proveniente de bebederos y piezas defectuosas. La viscosidad la analiza con un reómetro de rotación, la tensión con una máquina de tracción y la inflamabilidad con suspensión sobre llama durante diez segundos. Concluye que para las piezas analizadas en su estudio, el porcentaje de reciclado óptimo es de un veinte por ciento ya que asegura las condiciones de proceso, funcionalidad y rentabilidad.

KIKUCHI [15] analiza como la utilización de un sistema de vibración mejora las propiedades del material reciclado. Para ello compara los resultados que obtiene durante la inyección en un molde dotado con sensores de presión en la cavidad, tras la inyección de poliestireno virgen y poliestireno mezclado con distintos porcentajes de material reciclado tratado y sin tratar con el sistema de vibración, y los resultados de tracción de las muestras que obtienen de la inyección. Comprueba que la utilización del sistema de vibración aumenta la resistencia de la pieza inyectada con material reciclado por encima incluso de la pieza inyectada exclusivamente con material virgen.

PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Los programas informáticos de simulación de inyección de termoplásticos están siendo de gran ayuda para los diseñadores y transformadores de piezas de plástico, debido a que bien utilizados son muy eficaces en la detección de posibles problemas en el desarrollo y producción de la pieza.

Muchos autores se implican en el estudio de estos programas informáticos; en las ecuaciones que utilizan para la realización de los cálculos y en los valores que se incluyen en las bases de datos de las que disponen.

KOSZKUL [16] analiza los resultados que se obtienen de realizar la simulación de inyección a una misma geometría, con las mismas condiciones de proceso pero utilizando las distintas ecuaciones que definen la viscosidad de un PE-HD. Las ecuaciones de viscosidad que utiliza son; ecuación de primer orden, ecuación de segundo orden, modelo de matriz, modelo de Ellis, modelo de Carreau y modelo de Cross.

HABERSTROH [17] defiende que la caracterización reológica no describe completamente el comportamiento del material y que en función de la geometría de la pieza y del molde, este se carga de tensión que afecta directamente al proceso de inyección. Compara los resultados obtenidos con el modelo viscoso obtenido de forma convencional y los resultados obtenidos con el modelo viscoso obtenido con un reómetro que caracteriza el material bajo una cierta carga de tensión.

Otros autores se centran en el estudio de los resultados que ofrecen estos programas de simulación que existen en el mercado, por otra parte, cada vez más mejorados, en su aplicación al diseño y producción industrial, o en la comparación de los resultados que se obtienen de la simulación con los resultados que se obtienen en la producción industrial.

AÍSA [18] trabaja sobre la aplicación de los resultados que se obtienen de la simulación de una geometría concreta, para analizar la viabilidad de producción a partir de los resultados de presión y fuerza de cierre.

FERNANDEZ [19] utiliza un programa de simulación para la determinación de uno de los parámetros de proceso de inyección; la velocidad de inyección, a través del análisis de un resultado de simulación, la temperatura del material en el interior del molde.

CLAVERIA [20] estudia la aplicación de programas de simulación a procesos de inyección no convencionales.

ARTICULOS YA PUBLICADOS DE LA TESIS

La realización de este trabajo ha permitido que según se ha ido desarrollando, se hayan publicado partes del trabajo realizado:

JAVIERRE [21] presenta el método de caracterización desarrollado a través del molde espiral para la caracterización viscosa de procesos de inyección no convencionales

JAVIERRE [22] analiza la influencia en el comportamiento reológico de un PE-HD para un proceso de inyección, la introducción de diferentes porcentajes de material reciclado

De la misma forma, durante el desarrollo de la tesis se han presentado y defendido los resultados que en ella se han ido obteniendo en diferentes congresos internacionales.

Título: Validation of the methodology for thermoplastic bi-injection moulding process to optimize thermomechanical welding

Congreso: AMPT 2006

Lugar: Las Vegas. Fecha:2006 .

Carácter: Internacional. Idioma: Ingles.

Autor: Claveria, Fernadez, Javierre, Escudero, Planta

Organizador: AMPT

TÍTULO: VALIDATION OF THE METHOD FOR GENERATION OF RHEOLOGICAL MODEL TO CHARACTERIZE NON-CONVENTIONAL INJECTION MOLDING BY MEANS OF SPIRAL MOLD

Congreso: AMPT 2008

Lugar: Manama, Kingdom of Bahrain Fecha: Nov 2008 .

Carácter: Internacional. Idioma: Ingles.

Autor: Javierre, Claveria, Fernadez, Ponz

Organizador: AMPT

3.- SIMULACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN.

En este capítulo se pretende hacer de forma breve, una introducción a la situación actual en cuanto a las posibilidades actuales para realizar simulaciones de inyección de plástico, y a las condiciones para caracterizar el comportamiento viscoso de los polímeros.

En primer lugar se realiza una visión general de cómo funciona un programa de simulación de inyección, que tipo de análisis es capaz de realizar, que parámetros son necesarios para que realice los cálculos y las limitaciones que tiene a la hora de simular algunos tipos de inyección.

En segundo lugar, se realizará un resumen teórico general sobre el comportamiento viscoso de los fluidos, y más concretamente sobre los termoplásticos. También se explicará como se realiza generalmente la caracterización viscosa de los plásticos utilizados en la fabricación de piezas inyectadas, mediante un reómetro capilar.

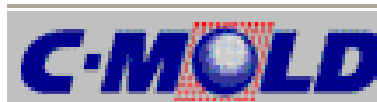
Para finalizar plantearemos la problemática que aparece a la hora de simular algunos procesos de inyección y reproducir algunas condiciones que se van a denominar como no convencionales a partir de los cuales surge la realización de este trabajo.

3.1.- HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.

En el desarrollo de una pieza de plástico inyectada se realiza una inversión muy importante en el diseño y construcción del molde con el que va a ser fabricada. Un óptimo diseño del molde es fundamental para obtener una calidad de pieza adecuada. El diseñar mal un molde supone un problema importante desde dos puntos de vista principalmente; puede suponer una pérdida económica importante por el coste del molde y porque puede condicionar la posterior inyección de la pieza y la calidad de la misma y un problema de plazos ya que las posteriores modificaciones que se deban realizar puede suponer un retraso en el desarrollo de un proyecto del conjunto al que pertenezca la pieza. Los programas de simulación son herramientas que pueden servir para la realización de un diseño óptimo del molde. Mediante estas herramientas se puede hacer un diseño virtual del molde y simular posteriormente su inyección de cara a asegurarse que con el diseño planteado el molde funciona de forma correcta, de cara a prever problemas en el proceso de inyección y de cara a obtener una pieza de calidad en un tiempo adecuado. Mediante los resultados obtenidos de los programas de simulación se pueden analizar la viabilidad de la geometría de la pieza y del molde, los medios necesarios para su fabricación, los tiempos de ciclo.

Existen en el mercado varios programas informáticos, que permiten realizar simulaciones de inyección de plásticos. Destacar entre otros Moldflow y Moldex. Actualmente dentro del TIIP se trabaja con Moldflow, pero C-Mold ha sido muy utilizado a pesar de que actualmente no se comercializa.

- C-Mold:



- Moldflow



-Moldex



Estos programas cuentan con tres partes básicas:

- Un **bloque de pre-procesado**, donde se construye en primer lugar la geometría de la pieza y a partir de la misma, se genera la malla con la que el programa ejecutará posteriormente el cálculo.
- Un **bloque de cálculo**, donde se introduce:
 - Por una parte la malla de la pieza.
 - Por otra, los datos referidos al material, datos de máquina y del molde.
 - Finalmente las condiciones de trabajo del proceso o “condiciones de contorno”, como el tiempo de llenado, temperaturas de trabajo, etc.
- Un **bloque de post-procesado**, en el que a partir de puntos y elementos de la malla se representan en pantalla los resultados en forma gráfica, además de poder acceder a datos numéricos (peso de pieza, presión máxima, etc.).

Los programas de simulación de inyección ofrecen la posibilidad de realizar distintos tipos de análisis, en función del tipo de inyección que se quiera simular, como;

- Inyección de termoplásticos.
- Inyección secuencial.
- Inyección con gas.
- Co-inyección o inyección bimateria.
- Inyección - compresión....

Para poder simular un caso de inyección es necesario introducirle al programa unos datos que podemos agrupar en tres bloques.

- 1.- Molde.
- 2.-Material
- 3.-Datos de proceso.

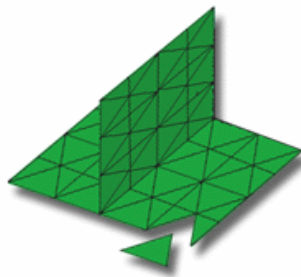
Las características necesarias para realizar la simulación correspondiente al molde están formadas por la geometría de la pieza o piezas, el sistema de alimentación y el sistema de refrigeración.

Geometría de la pieza.

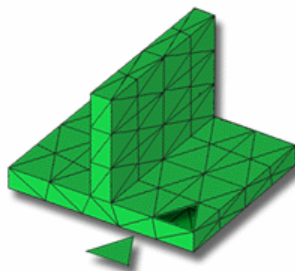
La geometría de la pieza o piezas que contiene el molde que queremos simular se introduce mediante el paquete de modelado que lleve el programa de simulación o se exporta de algún otro programa de dibujo. Para poder realizar los cálculos, el programa necesita disponer de la geometría de la pieza en forma de malla, un modelo geométrico que habitualmente está formado por elementos triangulares conectados por nodos.

Si tomamos como referencia el Moldflow, esta malla puede ser de tres tipos;

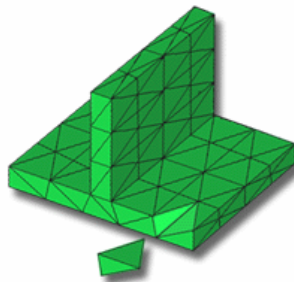
- Midplane o plano medio. Es una representación de la geometría de la pieza en la que solo se dibuja el plano medio de la misma y se le asignan diferentes espesores a cada zona.



- Surface o superficies. La geometría de la pieza se representa mediante las superficies exteriores de la pieza, como si fuera la cáscara exterior. El programa interpreta el espesor de cada zona de la pieza como la distancia que existe entre cada superficie.



- Volumen o volumen. La pieza se representa como una geometría tridimensional y no como un elemento plano al que se le asignan espesores. En este tipo de malla, los elementos son tetraedros con un nodo en cada una de las cuatro esquinas.



Los tipos de malla de superficie y de volumen, aunque visualmente son los que mejor representan la geometría de la pieza, no los vamos a utilizar en nuestro estudio por dos motivos principalmente;

- 1.-El número de elementos y nodos que necesitan este tipo de mallas es muy elevado, lo que aumenta excesivamente el tiempo de cálculo.
- 2.-Las comprobaciones realizadas hasta el momento de los resultados de simulación que obtiene el programa con las pruebas de inyección reales, son peores que los resultados obtenidos con una malla de tipo plano medio.

Por estas razones, el tipo de malla que vamos a utilizar en todas nuestras simulaciones de inyección va a ser del tipo plano medio.

La utilización de una malla del tipo plano medio también tiene un inconveniente, la representación de la geometría es un poco más complicada, hay que tener un especial cuidado al dibujar la pieza y al asignar los espesores ya que depende de cómo se haga se puede estar simulando la inyección de una geometría que no se corresponde con la pieza real.



Fig. Sección real de la pieza



Fig. Sección representada con una malla de plano medio

Como se puede ver en las imágenes anteriores la malla del tipo plano medio no es la que mejor representa la geometría de la pieza visualmente, es una representación de la geometría de la pieza adecuada a la simulación de inyección. Lo que se representa es lo que realmente afecta a los resultados que se obtienen de la simulación, y eso es la sección de paso en cada zona de la pieza, el espesor.

Otro parámetro importante a la hora de generar la malla de la pieza, es la densidad de malla.

Es importante que el número de elementos y nodos esté adecuado al tamaño de la pieza. Utilizar un tamaño de malla muy pequeño y obtener un número elevado de elementos y nodos, no proporciona mejores resultados de simulación. De la misma manera, si el tamaño de malla es demasiado pequeño, los resultados obtenidos de la simulación pueden no ser lo suficientemente precisos. Por eso es necesario que la densidad de la malla esté adecuada al tamaño y espesor de la pieza.

La geometría que se representa corresponde al hueco que será llenado con el material plástico, la superficie de dicha geometría no tiene textura pero sí que se le puede asignar material con sus correspondientes propiedades sobre todo en cuanto a conductividad térmica.

Sistema de alimentación.

Hay que representar los canales por los que el plástico circula desde el husillo, por el interior del molde hasta la pieza.

La representación implica el determinar si;

- . el canal es frío o es una cámara caliente,
- . la forma,
- . la longitud,
- . y la sección de paso tiene.

Es importante representar el sistema de alimentación correctamente, afecta directamente a las todas las fases del proceso de inyección, y en muchos casos, es un parámetro determinante en la viabilidad de la inyección y/o en la calidad con la que es posible la obtención de una pieza.

Sistema de refrigeración.

De los canales de refrigeración se determinan todos los factores que afectan directamente al proceso de inyección;

- . posición,
- . distancia a pieza,
- . longitud,
- . sección de paso,
- . colocación de la entrada y salida del refrigerante,
- . material que se utiliza como refrigerante o atemperante con sus propiedades,
- . caudal,
- . y temperatura a la que se introduce el refrigerante en los circuitos.

La modificación de cualquiera de estos factores puede condicionar los resultados que se obtienen de la simulación, por este motivo es importante introducir al programa de simulación toda la geometría del molde del que se obtiene la pieza a simular con la mayor precisión posible.

Material.

Los programas suelen disponer una extensa base de datos, con una gran cantidad de referencias de distintos tipos de materiales, con sus respectivas fichas de propiedades.

Si el material con el que se quiere realizar la simulación de inyección no se encuentra en la base de datos, el programa ofrece la opción de que se pueda modificar las propiedades de un material en concreto o introducir un material completamente nuevo en la base de datos.

Para cualquiera de las dos opciones anteriores, solo es necesario introducir las propiedades o parámetros del material que deseas modificar, o todas las propiedades y parámetros del nuevo material que son necesarios para que el programa pueda realizar los cálculos con los obtiene los resultados de simulación.

En la siguiente figura se muestra el fichero MTL correspondiente al material con el que trabaja el programa C-Mold, en el que se pueden ver las propiedades que utiliza para la realización de los diferentes cálculos. Estas propiedades son; densidad, rango de temperaturas, curvas de viscosidad, curva PVT, calor específico, conductividad térmica...

```

|--- Beginning of title
TITL      hostacom.mtl      : Performance (amorph)
FILE      04/26/02        10:59:36      C-MOLD v4.0
---- Beginning of << C-MOLD Material Properties - Version 4.0 >>
MTRL      1      21      Description of TCODE ....
1004      13      2-domain mod Tait polymer den
              377.15      6.801E-008      0.0010392      8.206E-007
              1.3306E+008      0.005684      0.00096999      3.928E-007
              2.0514E+008      0.0078315      6.9231E-005      0.095752
              7.8329E-009
1101      24      Tabulated polymer specific heat
              324.15      1779.81      343.15      1939.55
              358.15      2093.06      373.15      2344.56
              381.15      3227.5      389.15      9719.14
              394.15      3098.45      398.15      2220.81
              428.15      2283.81      458.15      2380.34
              488.15      2471.05      523.15      2457.62
1201      24      Tabulated polymer therm conduct
              311.15      0.322      332.15      0.321
              353.15      0.322      374.15      0.322
              394.15      0.313      415.15      0.312
              434.15      0.222      454.15      0.225
              474.15      0.218      493.15      0.219
              512.15      0.212      532.15      0.211
1313      7      Cross-WLF polymer viscosity
              0.285205      35631.3      4.57747E+012      263.15
              0      27.1711      51.6
1360      2      Exp juncture loss
              0.00183493      1.74397
1500      1      Transition temperature
              400.15
1600      2      Iso elastic tensor
              2.344E+009      0.36
1700      1      Isotropic thermal expan coeff
              7.12E-005
1999      0      Targor (Hoechst)/PP HOSTACOM X 4323 S68 104908 (fc puT)
6000      1      Constant coolant density
              988
6100      1      Constant coolant specific heat
              4180
6200      1      Constant coolant thermal conduct
              0.643
6302      3      Coolant viscosity w/ exp temp
              2.861E-005      783.8      396.8
6999      0      WATER (PURE)

```

Fig. Ejemplo de archivo .mtl

Para facilitar la modificación de un material o la introducción de uno nuevo, el programa de simulación permite trabajar con dos modelos reológicos distintos, así como introducir las constantes que caracterizan dichos modelos.

Los dos tipos de modelos reológicos que se pueden introducir en la base de datos de materiales del Moldflow son:

1.- El modelo de Cross-WLF

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \gamma}{\tau^*} \right)^{(1-n)}}$$

$$\eta_0 = D1 \cdot \exp \left[\frac{-A1 \cdot (T - T^*)}{A2 + (T - T^*)} \right]$$

Donde:

- η es la viscosidad en Pa·s.
- γ es la velocidad de cizalla en 1/s.
- T es la temperatura en K.
- $T^* = D2 + D3 \cdot P$, donde P es la presión en Pa.
- $A2 = A2 + D3 \cdot P$ en K
- n, τ^* , D1, D2, D3, A1, A2~ son las constantes.

2.- El modelo de Segundo orden.

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\gamma) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \ln(\gamma)^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\gamma) + A_5 \cdot T^2$$

Donde:

- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

Datos de proceso

Los datos de proceso se introducen en función del tipo de análisis de simulación de inyección que se quiere realizar en cada caso del estudio.

En función del tipo de análisis que se quiera realizar será necesario introducir más o menos variables y parámetros de proceso, del mismo modo, se obtendrán más o menos resultados.

En la figura siguiente se muestra el fichero .PRT correspondiente a la máquina y datos de proceso con el que trabaja el programa C-Mold, en el que se pueden ver las propiedades que utiliza para la realización de los diferentes cálculos.

```

---- Beginning of title
TITL      3pcen.prc      : SECUENCIAL
FILE      05/13/02      12:46:52      C-MOLD v4.0
---- Beginning of << C-MOLD Process Conditions - Version 4.0 >>
PROC      1      17      Description of TCODE ....
----
Machine description: Italtech/MSH-2000/201
10000     1      Max machine clamp force
           1.96078E+007
10001     1      Max machine injection volume
           0.00663795
10002     1      Max machine injection pressure
           1E+008
10005     1      Max machine injection rate
           0.0025239
10006     1      Machine hydraulic response time
           0.2
10100     1      Fill time ← Tiempo de llenado
           4
10102     1      Post-fill time ← Tiempo de compactación y refrigeración
           40
10104     1      Mold-open time
           2
10204     18     Timer for valve gate ← Control de válvulas
           1      0      50      2
           1.6    50      3      3.5
           5      4      60      50
           60     60     60     60
10300     1      F/P switch over by % volume
           99
10400     1      Timer for hold pressure ← Tiempo de compactación
           15
10602     12     Ram speed profile (rel) ← Programación de velocidad
           0      50      20      50
           40     50     60     50
           80     50     100    50
10700     4      Pack/hold pressure profile (abs) ← Presión de compactación
           0      40     100     40
11000     1      Ambient temperature
           348.15
11002     1      Inlet melt temperature ← Temperatura del material
           533.15
11100     10     Cooler manifold control ← Temperatura de la cámara caliente
           1      348.15  0.000166667  0
           1      2      348.15  0.000166667
           0      1
11200     3      Hot runner manifold control ← Temperatura de los canales de refrigeración
           1      533.15  0.01
---- End of file
ENDF
    
```

Fig. Ejemplo de archivo .PRC

Se puede realizar principalmente cuatro tipo de análisis llenado, compactación, refrigeración y alabeo. El objetivo de cada uno de estos análisis puede ser muy variado, a continuación se presenta un listado con objetivos que se pueden plantear con cada uno de ellos.

ANALISIS DE LLENADO

- Garantizar el llenado de la cavidad.
- Balancear el flujo de la cavidad.
- Determinar el número necesario de entradas y sus posiciones.
- Balancear el sistema de corredores.
- Minimizar el tamaño del corredor para reducir el material desperdiciado.
- Determinar la localización de las líneas de soldadura y su calidad.
- Identificar atrapamientos de aire.
- Identificar las condiciones de proceso óptimas.
- Verificar la orientación del flujo a lo largo de la pieza.
- Determinar el tamaño de la máquina de inyección al predecir la fuerza de cierre y el peso.
- Identificar áreas de alta tensión de cizalla o alta temperatura.
- Investigar opciones de diseño alternativas como inyección secuencial por aperturas y cierre de válvulas.
- Mejorar el acabado superficial y reducir el alabeo programando la velocidad de llenado.

ANALISIS DE COMPACTACIÓN

- Minimizar la variación de contracción volumétrica dentro de la cavidad la cuál puede causar alabeo.
- Reducir el nivel de tensiones en pieza.
- Identificar y reducir posibles zonas con rechupes.

- Determinar las condiciones óptimas de proceso como presión y tiempo de compactación.
- Minimizar la fuerza de cierre introduciendo un perfil de presiones de compactación adecuado.
- Determinar el peso de la pieza
- Verificar la orientación del flujo en el interior de la pieza.

ANALISIS DE REFRIGERACIÓN

- Optimizar los parámetros de proceso correspondientes a la refrigeración
- Evitar zonas calientes identificando los lugares en los que la refrigeración es pobre.
- Identificar los canales de refrigeración con una extracción de calor ineficiente.
- Reducir las tensiones internas debido a una refrigeración no uniforme en el molde.
- Optimizar el diseño de la pieza para conseguir un enfriamiento uniforme.
- Reducir el tiempo de ciclo y por tanto aumentar la productividad.
- Aumentar la calidad de la pieza.
- Reducir costes de producción.
- Determinar los caudales necesarios en cada circuito para una correcta refrigeración.

ANALISIS DE ALABEO

- Identificar el mecanismo dominante causante del alabeo de la pieza.
- Determinar los parámetros de proceso óptimos de cara a minimizar la deformación de la pieza.

Para la obtención de estos objetivos es necesaria la interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes análisis. En el siguiente cuadro se muestran los resultados que se obtienen en cada tipo de análisis con el programa C-Mold, que varían poco respecto a los obtenidos en otros programas.

CASO	RESULTADOS BÁSICOS
Llenado ("filling")	<ul style="list-style-type: none"> - . Isócronas. - . Presión máxima. - . Llenado. - . Salto térmico en llenado. - . Fuerza de cierre. - . Líneas de soldadura.
Compactación ("fillingandpostfilling")	<ul style="list-style-type: none"> - . Isócronas. - . Presión máxima. - . Fuerza de cierre. - . Presión a lo largo del tiempo. - . Líneas de soldadura. - . T^a en el ciclo. - . Contracción volumétrica. - . Tiempo útil de compactación.
Refrigeración ("cooling")	<ul style="list-style-type: none"> - . T^a pieza. - . T^a molde. - . Diferencia de T^a entre caras del molde y pieza.
Alabeo ("shrinkagewarpage")	<ul style="list-style-type: none"> - . Deformada de la pieza. - . Contribución de la refrigeración a la deformación. - . Contribución de la forma de la pieza a la deformación.

Los programas de simulación son una herramienta y los resultados que con ellas se obtienen dependen del usuario que maneja dicha herramienta. Para un correcto uso de la misma es importante conocer en profundidad el proceso de inyección y los elementos que intervienen; máquina, molde y material, de cara a la correcta preparación

de los casos y además, sobre todo, saber interpretar correctamente los resultados que se obtienen. A pesar de que los resultados de los programas son imágenes y valores concretos, diferentes interpretaciones de los mismos pueden dar lugar a conclusiones muy diferentes en función de la experiencia y del criterio de la persona que los analiza.

A modo de ejemplo, a continuación se presentan varias imágenes de resultados obtenidos de la simulación de inyección de una pieza y la interpretación que de cada resultado se puede realizar.

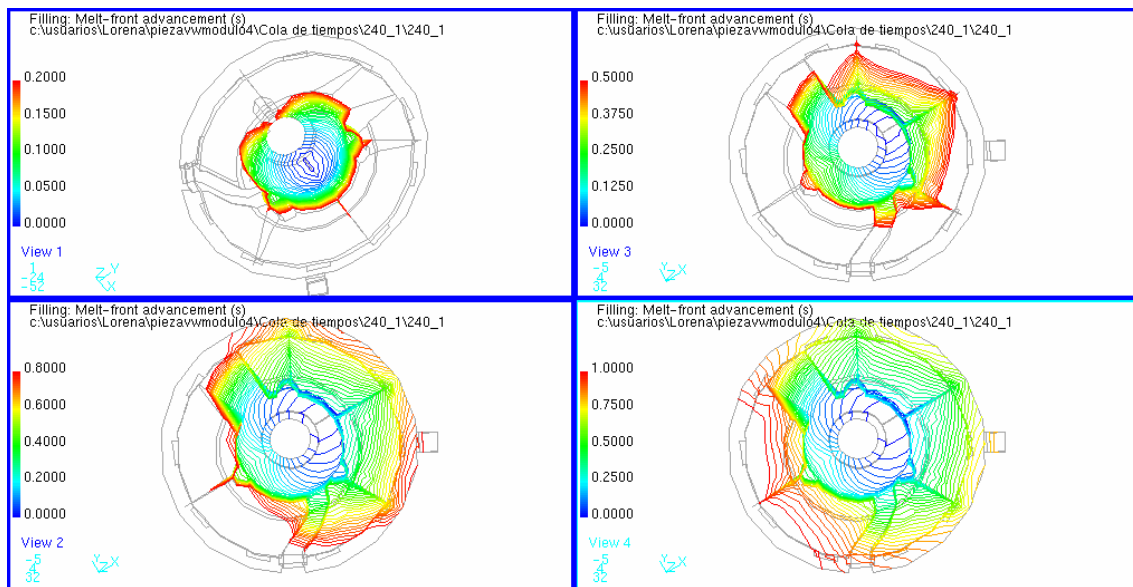


Fig. Evolución del llenado de la pieza en líneas.

En la figura anterior observamos el avance del flujo del material en el interior del molde durante la fase de llenado. El tiempo que transcurre entre cada una de las líneas es el mismo, lo que implica que en las zonas de la pieza donde las líneas estén más próximas el material avanza más lento, y en las zonas donde la distancia entre las líneas es mayor quiere decir que el material avanza más deprisa.

Observando las imágenes vemos como en la zona próxima al punto de entrada y en la zona donde finaliza el llenado las líneas se separan, son zonas donde el flujo de material es más rápido. Esto nos ayuda a conocer la geometría de la pieza y a programar de una forma óptima las velocidades de inyección durante la fase de llenado con el

objetivo de conseguir que el flujo de avance de material sea lo mas constante posible, es decir, que la distancia entre las líneas sea lo mas regular posible. Esto no ayuda a evitar defectos superficiales en la pieza.

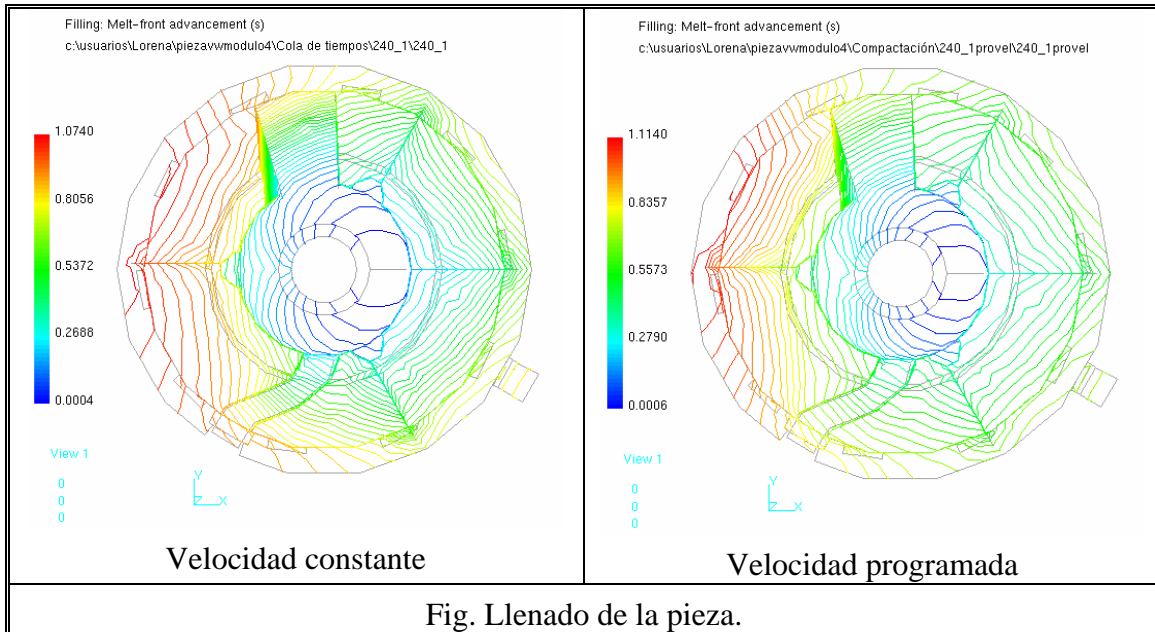


Fig. Llenado de la pieza.

En la figura anterior vemos que con la programación de velocidades el avance de flujo de material por el interior del molde es mucho más regular que en el caso de realizar el llenado de la pieza a velocidad de avance del husillo constante.

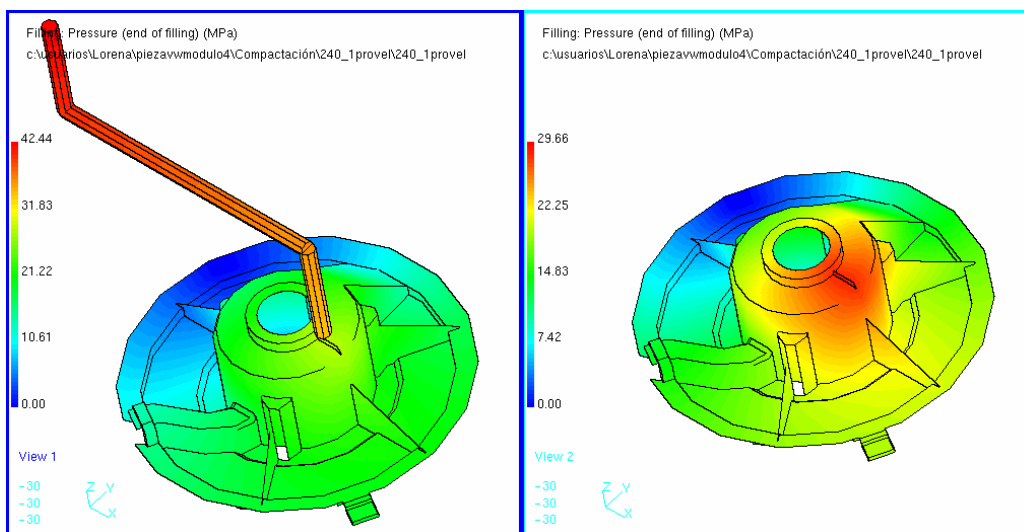


Fig. Presión al final de la fase de llenado.

En la figura anterior vemos la distribución de presiones que existe en la pieza al final del llenado. Se observa que la zona donde finaliza el llenado tiene presión cero, pero la zona opuesta tiene una presión específica de unos 20 bares. Esta zona se está compactando ya durante la fase de llenado. La consecuencia de que el llenado de la pieza no sea simétrico para toda la pieza es el desequilibrio de presiones que se produce, que a su vez puede provocar que la pieza se deforme ligeramente perdiendo su forma circular.

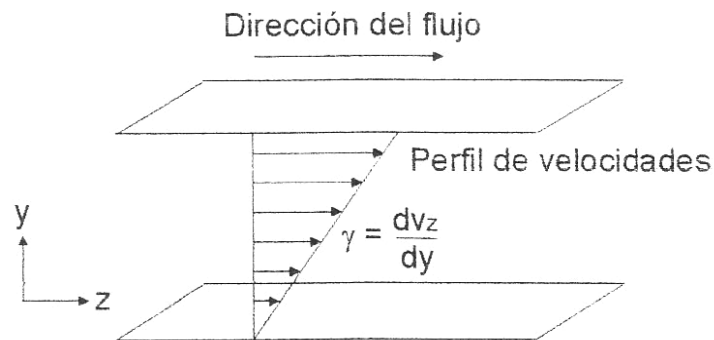
3.2.- CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA CONVENCIONAL

La viscosidad es una propiedad intrínseca de los fluidos, es su resistencia a fluir o derramarse por el interior de un conducto.

La viscosidad η , se define como el coeficiente entre tensión de corte τ y la velocidad de cizalla γ :

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \Rightarrow \text{con} \Rightarrow \left[\begin{array}{l} \gamma = \frac{dv_z}{dy} \\ \tau = \frac{F_z}{A} \end{array} \right]$$

Donde: $v_z = f(z)$; $v_x = v_y = 0$



No es un valor constante característico del material, sino que depende significativamente de las condiciones de presión, temperatura y velocidad a la que esté sometido en cada instante, su valor varía en función de estas condiciones.

Si la velocidad de deformación es muy pequeña, el valor de viscosidad es casi constante, en estos casos hablamos de viscosidad newtoniana.

A partir de un determinado valor, la viscosidad disminuye de forma constante, entonces nos referimos a la viscosidad como viscosidad estructural.

Cuando las velocidades de deformación son muy elevadas, la viscosidad tiende a alcanzar un valor límite denominado viscosidad newtoniana límite, η_∞ .

Los fluidos se pueden clasificar dependiendo de cómo varía la viscosidad al variar los parámetros de los que depende. Cada tipo de fluido tiene una ecuación de viscosidad que lo caracteriza.

Distinguiamos dos tipos de fluidos: fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.

Fluidos newtonianos

Se caracterizan porque el valor de viscosidad no depende de la velocidad de cizalla, es decir, no se produce pérdida de energía cuando se producen colisiones entre las moléculas que lo componen.

Son los fluidos más comunes en condiciones normales, gases y líquidos de moléculas pequeñas.

La ecuación que define la viscosidad de este tipo de fluidos, en función de las condiciones de las que depende es la ecuación de viscosidad de Newton:

$$\tau = \eta \cdot \gamma$$

Siendo:

- τ : Tensión de corte.
- η : Viscosidad del material.
- γ : Velocidad de cizalla.

La tensión cortante es directamente proporcional a la deformación que se produce en el fluido, siendo la constante de proporcionalidad, la viscosidad.

Fluidos no newtonianos

Se caracterizan porque la deformación del fluido no es directamente proporcional al esfuerzo cortante que se produce, es decir, se produce una disipación de energía debido a las colisiones que se producen entre las moléculas que componen el fluido.

Este tipo de fluidos pueden ser o no dependientes del tiempo.

La ecuación que define la viscosidad para este tipo de fluidos se basa en el modelo de la ley de la potencia, que para un flujo unidimensional es:

$$\tau = K \cdot \gamma^n$$

Siendo:

- τ : Tensión de corte.
- K: Índice de consistencia.
- γ : Velocidad de cizalla.
- n; Índice de comportamiento del flujo.

Para los fluidos no newtonianos, por definición se determina que:

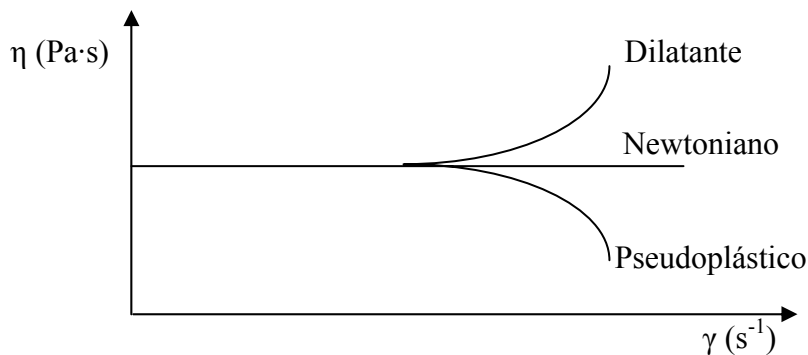
$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

Si aplicamos esto a la ley de la potencia, la ecuación anterior también se puede expresar como:

$$\eta = K \cdot \gamma^{n-1}$$

En función del valor que tome n , el comportamiento del flujo será completamente diferente, por eso se caracterizan los fluidos en función del valor de n .

- Si $n=1$; la ecuación anterior se convierte en la ley de viscosidad de Newton, por lo que sería un fluido newtoniano.
- Si $n>1$, será un fluido dilatante.
- Si $n<1$, será un fluido pseudoplástico.



Los polímeros fundidos son fluidos pseudoplásticos, es decir, su viscosidad disminuye conforme aumenta la temperatura y la velocidad de cizalla.

El cálculo de esta propiedad de cualquier tipo de material se realiza utilizando un reómetro.

Existen varios tipos de reómetros, de placas, de placas paralelas, de ranura... aunque los más utilizados son los reómetros rotacionales y los reómetros capilares. Los reómetros rotacionales están basados en el flujo de Couette con cilindros concéntricos y los reómetros capilares se basan en el flujo de presión.

Para calcular la viscosidad de materiales plásticos, los reómetros que se utilizan con mayor frecuencia son de tipo capilar.

El ensayo consiste en hacer pasar a lo largo de un capilar del que se conoce su diámetro y longitud, una cantidad de plástico fundido a una temperatura controlada y presionando el material con un pistón que también ejerce una presión determinada con el fin de provocar una velocidad de flujo de plástico fundido a través del capilar.

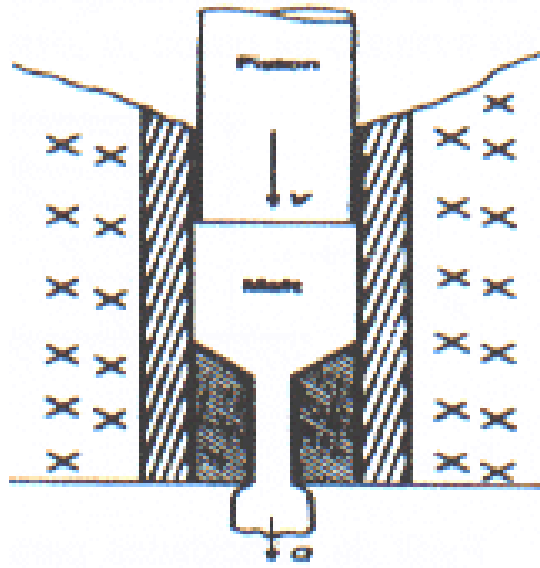


Fig. Esquema de funcionamiento de un reómetro

Para poder construir las curvas reológicas e incluso calcular el modelo viscoso del material, es necesario realizar el ensayo a varias temperaturas y con distintas velocidades de flujo de plástico.

DESCRIPCIÓN Y USO DE UN REÓMETRO

El reómetro capilar que se ha utilizado para realizar los ensayos reológicos es el que se encuentra disponible en el área de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica, GOTTFERT 1500

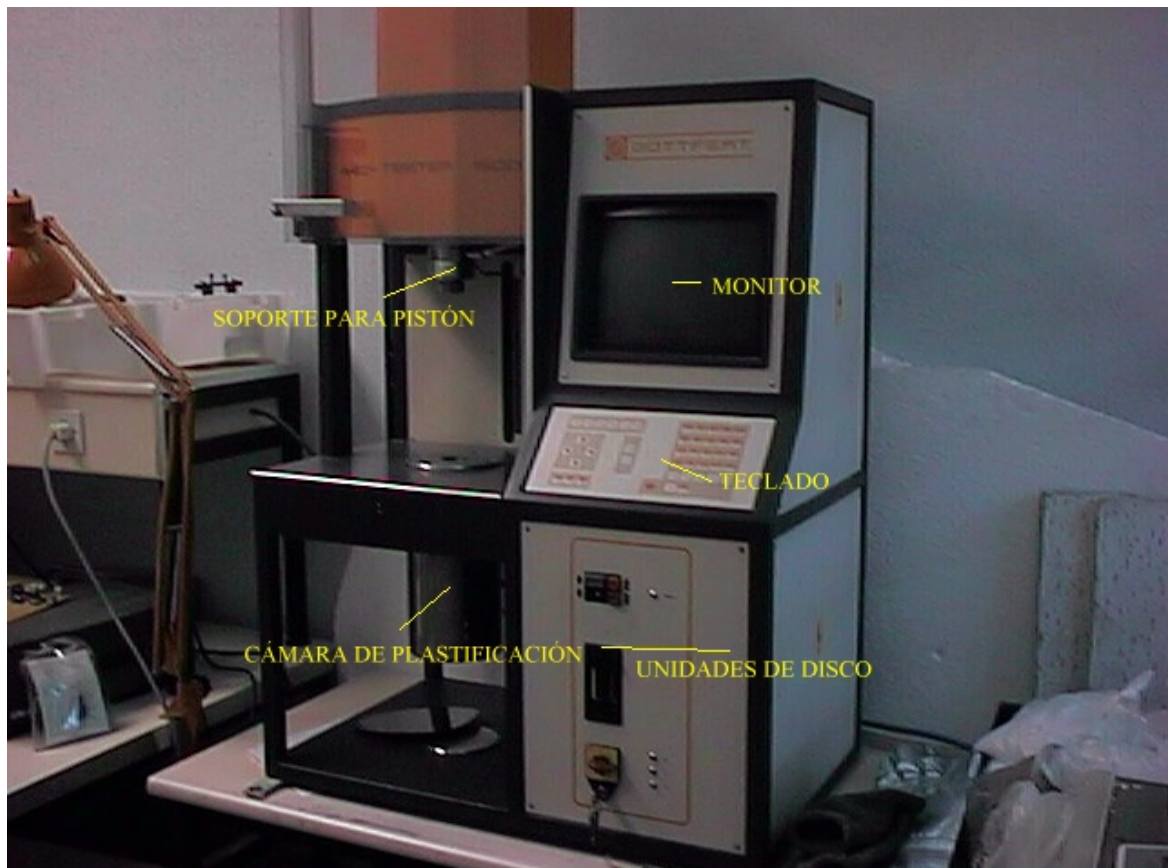


Fig. Imagen del reómetro utilizado para los ensayos.

En la figura anterior podemos distinguir las diferentes partes de las que se compone un reómetro:

- . Monitor
- . Teclado.
- . Unidades de disco.
- . Cámara de plastificación.
- . Pistón extrusor.

En la cámara de plastificación se introduce el plástico en estado sólido, y a través de un sistema de calefacción el plástico se funde y se mantiene a la temperatura de ensayo elegida.

El pistón extrusor es un embolo a través del cual se realiza presión en la cámara provocando que el plástico fundido fluya a través del capilar.

Los reómetros disponen de distintos capilares en función del tipo de material que vaya a ser analizado. Por este motivo, no es una parte fija y es necesario montarlo cuando la cámara de plastificación ya está a la temperatura de ensayo.

Para su montaje se utilizar las piezas que aparecen en la siguiente imagen.



Fig. Capilar y piezas de montaje

Para la limpieza de la cámara de plastificación, del embolo y del capilar se utilizan diferentes herramientas, que se muestran a continuación.



Fig. Herramientas para la limpieza.

Como se observa en la figura anterior el capilar es una pieza metálica en la que hay mecanizado un conducto de una longitud y un diámetro determinado. Para su montaje es necesario; el anillo posicionador (pieza A) que permite el montaje de capilares de diferentes longitudes posicionando el termopar siempre a la misma altura y el cierre roscado (pieza B) que permite la fijación del capilar y el anillo a la cámara de plastificación.

El capilar tiene un pitón que encaja con una ranura en la parte inferior de la cámara y permite localizar radialmente el alojamiento correcto del termopar.

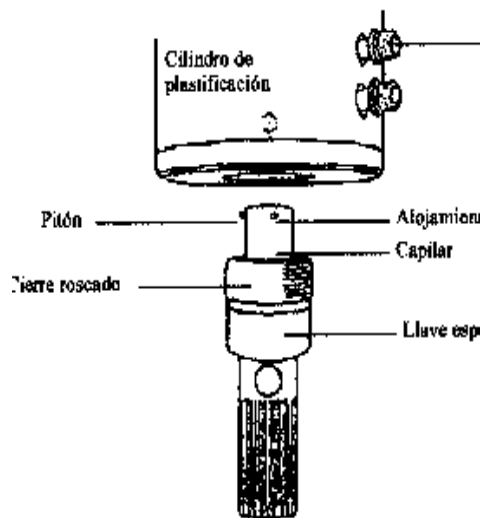


Fig. Esquema de componentes del montaje del capilar

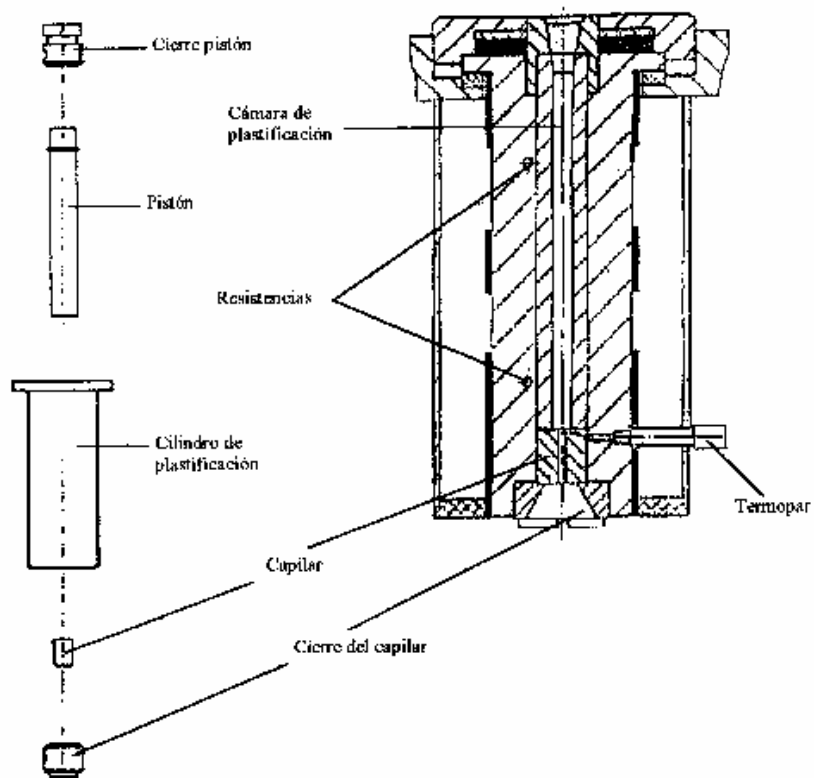


Fig. Vista estallada y capilar montado en sección.

Terminado el montaje de todos los elementos que componen el reómetro, se introducen a través del monitor y el teclado, las condiciones a las que se va a realizar el ensayo.

A continuación se introduce el material en granza en la cámara por la boca que se localiza en la parte superior de la cámara de plastificación, comprimiéndolo con una barra de cobre para evitar que retenga aire y falsee los resultados del ensayo, ya que el embolo avanzaría sin apenas resistencia.

Cuando el material ya está fundido se le aplica una precarga para homogeneizar el material que se encuentra en el interior de la cámara de plastificación. A continuación se lanza el ensayo desde los controles del ordenado, y tras esperar el tiempo de curado que se determine necesario para la correcta fusión del material, comienza el ensayo, el emboló comenzará a extruir plástico a través del material.

Como resultado del ensayo se obtienen valores de caída de presión para las variables impuestas.

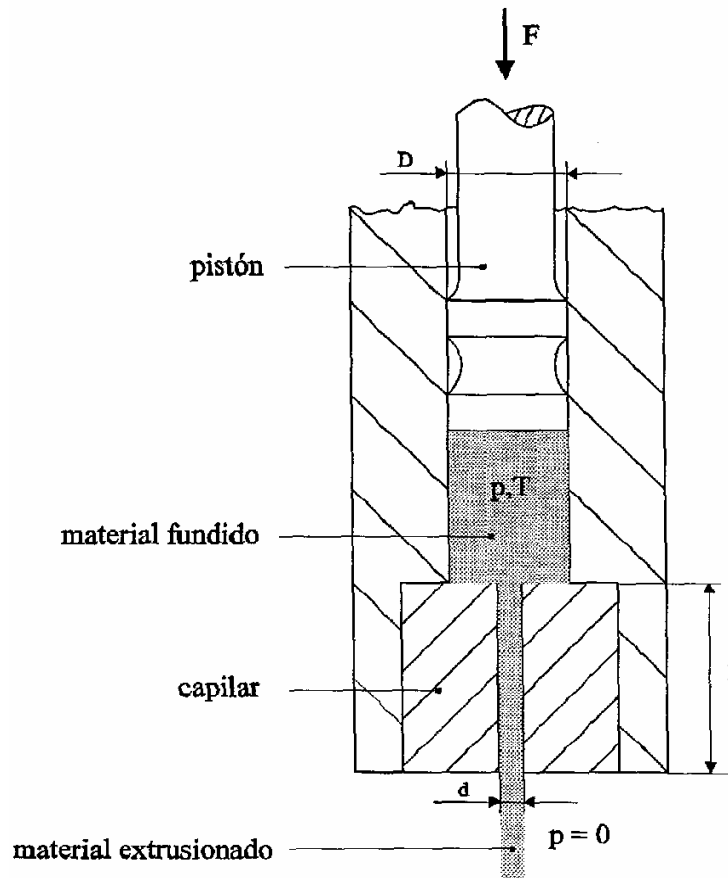


Fig. Esquema de un reómetro capilar.

Para facilitar y simplificar el cálculo, a las ecuaciones matemáticas que determinan el flujo dentro del capilar se les aplican varias aproximaciones en el comportamiento plástico, que con los valores de caída de presión (ΔP) obtenidos en el ensayo, y con las variables impuestas, permiten calcular los valores de velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), tensión cortante (τ), y viscosidad aparente (η) del fundido.

El cálculo de los valores de viscosidad aparente para cada una de las condiciones iniciales impuestas se realiza a través de la ecuación de viscosidad expuesta anteriormente.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

La velocidad de cizalla se determina con el caudal y el radio del capilar utilizado.

$$\gamma = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot r^3}$$

El caudal es constante tanto en el cilindro como en el capilar y se calcula con la velocidad de flujo impuesta en el ensayo y el radio del cilindro.

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot V$$

El esfuerzo cortante es la fuerza aplicada sobre el capilar por la superficie lateral del mismo.

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{r \cdot \Delta P}{2 \cdot L}$$

Posteriormente para mejorar estos valores de viscosidad aparente calculados y hacerlos más precisos, se les aplican varias correcciones. Las dos principales correcciones que se aplican en el cálculo de viscosidades con un reómetro capilar son:

- Corrección de Bagley:

Esta corrección se basa en la suposición inicial de que el flujo de plástico en el interior del capilar es constante.

Esta condición de partida en realidad no se cumple ya que existen cambios de sección por donde circula el flujo, tanto a la entrada como a la salida del capilar. Estos cambios en la sección por donde circula el flujo provocan variaciones de presión a la entrada y a la salida del capilar, lo que afecta directamente a los valores de viscosidad calculados.

- Corrección de Rabinowitsh:

Esta corrección se basa en la suposición inicial de que el flujo no desliza a través de las paredes del capilar, por lo que se supone que se genera un perfil de avance de material plástico parabólico en el interior del capilar.

Esta suposición inicial tampoco se cumple, ya que en realidad el plástico se desliza ligeramente por la pared del capilar, lo que provoca que el perfil de avance del flujo sea más plano del perfil supuesto. Esta discrepancia entre el perfil que genera el plástico al avanzar por el capilar afecta directamente a los valores de viscosidad calculados.

Con los valores de viscosidad corregidos y con las condiciones iniciales se pueden construir las curvas de viscosidad del material analizado.

Como se observa, el método y los ensayos a realizar para la caracterización de esta propiedad están completamente definidos, por lo que no van a ser objeto de nuestro trabajo.

3.3.- PROBLEMÁTICA

Analizando los datos con los que trabajan los programas de simulación y analizando los factores y parámetros que realmente influyen y se programan, se puede llegar a la conclusión que algunos factores influyentes no se consideran en los cálculos realizados por los programas de simulación.

Haciendo un análisis en detalle de aquellos factores que no se consideran de forma exacta y agrupándolos siguiendo un criterio análogo a los del apartado 3.1 obtenemos lo siguiente.

Geometría de molde:

La geometría utilizada por los programas de simulación para el cálculo está limitada por el elemento utilizado para mallar. El elemento con el que se malla tiene asociado un espesor y se hacen aproximaciones a la hora de modelizar una zona de espesor variable donde el cambio de espesor se produce de una forma suave o a la hora de tener una variación de espesor brusca que al trabajar con la línea media la variación de espesor se realiza de forma simétrica. Otro aspecto que no se tiene en cuenta es la superficie del molde tanto por su textura como por su rigidez, muchos moldes van texturizados con texturas de mayor o menor profundidad y que influyen en el flujo del material y en la estética de la pieza, también existen procesos de inyección donde se producen sobreinyección de materiales que en muchos casos tienen una rigidez inferior a la del material del molde y llegan a deformarse bajo el efecto de la presión de inyección, los programas de simulación suponen que el molde es liso e infinitamente rígido. Por último hay que tener en cuenta que los elementos con los que se malla son planos y con bordes rectos y que para que la malla se adapte bien a formas curvas se debe utilizar una malla muy fina que en ocasiones puede complicar el cálculo.

Material:

Los datos con los que trabajan los simuladores relativos al material han sido descritos en el apartado 3.1. Estos datos no recogen factores que se saben influyen en algunos casos de forma notable en la calidad de la pieza, destacamos entre otros, la introducción de material reciclado, el tamaño de grano del material, su forma geométrica o su uniformidad, la humedad que pueda absorber o la adición de colorantes.

Parámetros de proceso:

Los parámetros de proceso que se pueden introducir en un programa de simulación son muy numerosos, aun así, en la realidad se pueden controlar más parámetros de lo que introducimos en la simulación. La fase donde más diferencia existe entre realidad y simulación en este aspecto es la fase de dosificación. En la simulación no se pueden introducir, o si se introducen no se tienen en cuenta para el cálculo, datos tan importantes como por ejemplo; perfil de temperaturas a lo largo de la unidad de plastificación, % de dosis de la máquina que se utiliza, contrapresión, revoluciones de giro y tiempo de residencia del material. Todas estas propiedades influyen sobre el estado real del material termoplástico que se inyecta y por tanto sobre el proceso de inyección y la pieza que se va a obtener.

De lo expuesto en este apartado se deduce que los programas de simulación tienen limitaciones en cuanto a los datos de partida con los que trabajan y que estas limitaciones pueden, en algunas ocasiones, llevarnos a resultados alejados de la realidad dependiendo de la influencia de estas limitaciones sobre el proceso.

Por otro lado la viscosidad es uno de los datos principales con los que trabaja un programa de simulación cuando se analiza la inyección de una pieza en plástico. En condiciones normales, la viscosidad de un polímero se determina con un reómetro capilar como se explica en el apartado anterior.

Es un parámetro que tiene una elevada dependencia de la temperatura y de la velocidad, por lo que estas variables están muy controladas cuando se realizan los ensayos para determinar las constantes que definen el modelo reológico de un termoplástico. Por otro lado, esta dependencia puede suponer un problema cuando lo que se quiere caracterizar es el comportamiento viscoso de un plástico en el que las condiciones de temperatura y velocidad de flujo no pueden ensayarse en un reómetro. El proceso de inyección de plásticos está avanzando a gran velocidad los últimos años, con el objetivo de ofrecer un abanico mayor de posibilidades a la hora de inyectar piezas. Aparecen mezclas de materiales, materiales espumados, materiales que reaccionan en un husillo durante la plastificación, materiales reciclados con un tamaño de granza muy elevado y poco uniforme, sobreinyecciones... Para estos tipos de proceso de inyección, que vamos a denominar “condiciones de inyección no convencionales”, el comportamiento viscoso es muy complejo o no se puede caracterizar mediante un reómetro capilar. Estos problema de caracterización hacen que la simulación de estos procesos sea muy compleja o se tengan que realizar aproximaciones que en muchos casos nos lleven a resultados inexactos.

Planteadas las limitaciones que presentan los programas de simulación se propone desarrollar una metodología de caracterización de materiales termoplásticos mediante un molde espiral utilizando medios industriales, de cara a conseguir:

- 1) Obtener modelos viscosos que caractericen reológicamente el material en las condiciones de transformación reales. El modelo reológico que se obtuviera mediante este sistema podría tener en cuenta las propiedades intrínsecas del material, las condiciones reales de la granza que se utiliza, (forma, tamaño, humedad, % de reciclado etc.), el proceso de plastificación sufrido por el material, (máquina utilizada, parámetros específicos de dosificación etc.) y nivel de degradación en función de tiempo de residencia.

- 2) Obtener modelos viscosos que caractericen reológicamente el material junto a características específicas de la geometría del molde. El modelo reológico que se obtuviera mediante este sistema podría tener en cuenta las propiedades intrínsecas del material y la influencia en el flujo por estar en contacto con superficies rugosas, deformables o con propiedades físicas diferentes a las que se suelen utilizar normalmente en la fabricación de moldes.

- 3) Obtener modelos viscosos que caractericen reológicamente el material en procesos no convencionales como pueden ser mezclas de materiales, materiales espumados o que reaccionen durante su transformación u otros procesos que puedan aparecer.

Si podemos cuantificar la influencia de estas variables o condiciones no convencionales en el comportamiento del material a través de un “modelo viscoso” se podrá realizar una simulación de la inyección de estos nuevos procesos de inyección, de estas condiciones no convencionales o tener en cuenta parámetros que actualmente se desprecian.

El molde espiral sirve para la determinación de la longitud de flujo de un material para un cierto espesor a unas determinadas presión y temperatura del material. En este trabajo se le quiere dar un nuevo uso, se quieren obtener modelos viscosos equivalentes a partir de las medidas de presión que se pueden realizar en el interior del molde durante un proceso de inyección, determinar el comportamiento viscoso del material influenciado por unas condiciones especiales y así poder simular estas condiciones mediante un programa de simulación convencional.

El molde espiral permite realizar estos nuevos tipos de inyecciones, ya que al ser un proceso industrial, el material se ensaya en las mismas condiciones en las que va a ser utilizado.

Permite introducir films y textiles en la cavidad del molde, e inyectar las espirales con materiales que no pueden ser analizados en un reómetro, debido al tamaño de su granza o a porque necesitan del proceso de plastificación de una máquina de inyección para fundirse y reaccionar. Hay que tener en cuenta las limitaciones que tiene el molde espiral para el cálculo de modelos viscosos. La temperatura del material y del molde no están controladas con la misma precisión durante los ensayos como lo están en un reómetro capilar y esto hay que tenerlo en cuenta en el desarrollo del método.

4.- METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DESARROLLADA

En este capítulo se explica el método desarrollado para la caracterización reológica de materiales plásticos.

Este método de cálculo reológico no tiene como objetivo el cálculo de valores de viscosidad del material como propiedad intrínseca en materiales termoplásticos convencionales, ya que para eso existen métodos ya desarrollados con instrumentos más precisos para el cálculo, como el reómetro capilar.

Este método pretende poder caracterizar reologicamente materiales termoplásticos mediante un proceso industrial, de una forma **sencilla y económica**. Los materiales para ser caracterizados por este método son aquellos que por diversas causas no pueden ser caracterizados de forma convencional. El objetivo es que tras la caracterización reológica se obtenga un **“modelo viscoso equivalente”** obtenido de la aplicación del método pueda ser introducido en la base de datos de un programa de simulación de inyección, y así poder realizar estudios de simulación de inyección teniendo en cuenta la influencia de parámetros importantes utilizados en el proceso industrial o con materiales que no se pueden caracterizar de forma convencional..., es decir, para poder realizar simulaciones de inyección de “situaciones no convencionales”, como se explica mas detalladamente en el apartado 3.3.

Los primeros apartados se dedican a describir el material y los equipos necesarios para aplicar la metodología, así como las modificaciones que han sido necesarias realizar en los mismos para que los resultados que se obtengan sean fiables.

Los siguientes apartados describen como a de procederse para la realización de los ensayos experimentales y que resultados se obtienen, las operaciones de cálculo a realizar con los resultados obtenidos para el cálculo del modelo viscosos, y como introducir las constantes del modelo matemático calculado en la base de datos de un programa de simulación de inyección.

En los últimos apartados se describe como contrastar resultados que se obtengan de las simulaciones de inyección que se realicen con el nuevo modelo viscoso calculado, con pruebas de inyección experimentales realizadas en condiciones reales, y sacar las conclusiones oportunas.

4.1.- DESCRIPCIÓN DE MEDIOS NECESARIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

Para realizar la caracterización reológica y posterior obtención de los modelos viscosos equivalentes, son necesarios algunos elementos que nos permitan realizar, recoger y analizar las medidas oportunas.

Los elementos necesarios son;

- Un molde de sección de paso constante que permita calcular la diferencia de presión entre dos puntos, para lo que debe estar preparado con alojamientos que permitan instalar sensores de presión.
- Dos sensores de presión instalados en el molde espiral que se va a utilizar para realizar las medidas experimentales. Permitirán registrar los distintos valores de presión que se alcancen en el interior del molde durante el proceso de inyección.
- Una cadena de medida que nos permite traducir, recoger y almacenar los valores de presión registrados por los dos sensores de presión durante el proceso de inyección
- Una máquina de inyección del tamaño adecuado, para poder realizar la inyección del molde.
- Material plástico sobre el que se quiere realizar la caracterización reológica.

MOLDE ESPIRAL

El molde espiral utilizado es el diseñado por D. Francisco Serraller para su tesis doctoral. Como su propio nombre indica, es un molde con una huella en forma de espiral de Arquímedes.

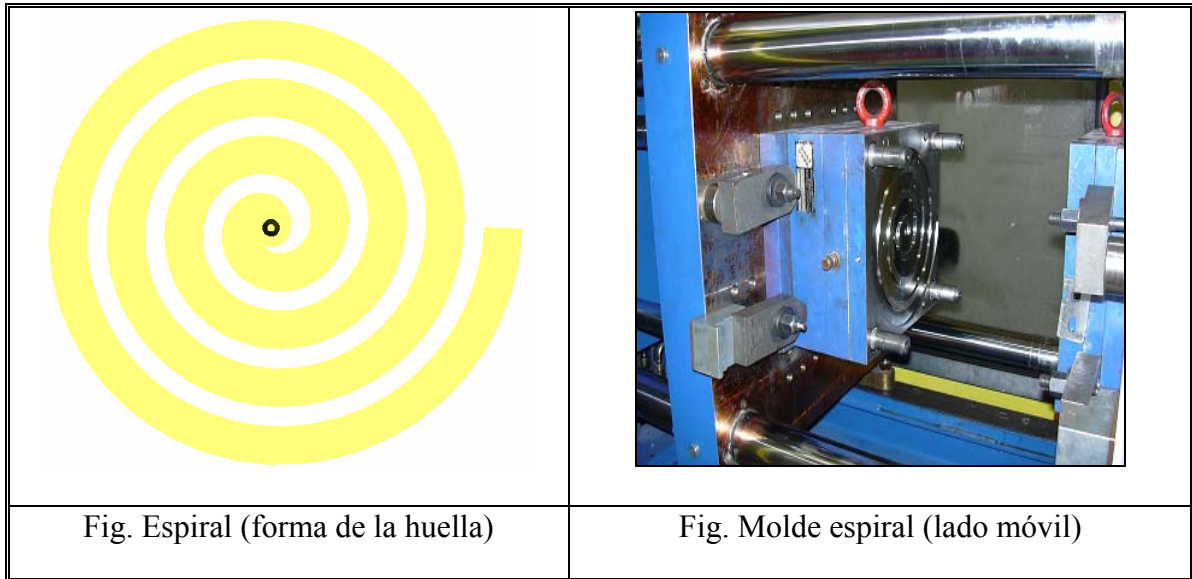
La longitud de la huella espiral es de 136cm, lo que equivale a 3 vueltas completas y $\frac{3}{4}$ de vuelta. La sección es rectangular, tiene unas dimensiones de 20mm de ancho por 2mm de espesor, y se encuentra gravada en la parte móvil del molde. En la parte fija del molde está mecanizada la medida de su longitud, de centímetro en centímetro, lo que permite ver de forma sencilla y rápida hasta donde llega el material, y saber la longitud máxima que podrá recorrer el polímero en unas condiciones de inyección determinadas.

Es abierto, lo que quiere decir que el volumen de material a introducir en el molde no está limitado, si el material inyectado superase la huella de la espiral mecanizada, saldría por el lateral al exterior del molde.

El sistema de alimentación de este molde es a través de una mazarota cónica de 2° de semiángulo, con 70mm de longitud y con un diámetro de 4mm a la entrada. La mazarota se prolonga 10mm por debajo del plano de partición para asegurar su extracción.

Es sistema de refrigeración consta de dos circuitos, uno en la cavidad y otro en el punzón del molde. Se adaptan a la geometría de la pieza ya que están mecanizados entre placas. Son cuatro canales circulares de sección rectangular unidos entre si.

La similitud entre la geometría de la pieza y la de los canales de refrigeración es para intentar conseguir extraer el calor del material lo más rápidamente posible del molde y así mantener las placas a una temperatura uniforme.



Dispone de alojamientos para colocar dos sensores de presión a lo largo de recorrido de la espiral. Estos sensores nos permiten obtener durante el proceso de inyección, los valores de presión que se alcanzan en esos puntos concretos de la espiral.

En la cara posterior de la placa sufridera del lado fijo hay una ranura mecanizada para facilitar la salida de las conexiones de los sensores de presión.

Aunque no es su utilización habitual, en este estudio se pretende utilizar el molde espiral para el cálculo de viscosidades aparentes de material a través de los sensores de presión que tiene colocados.

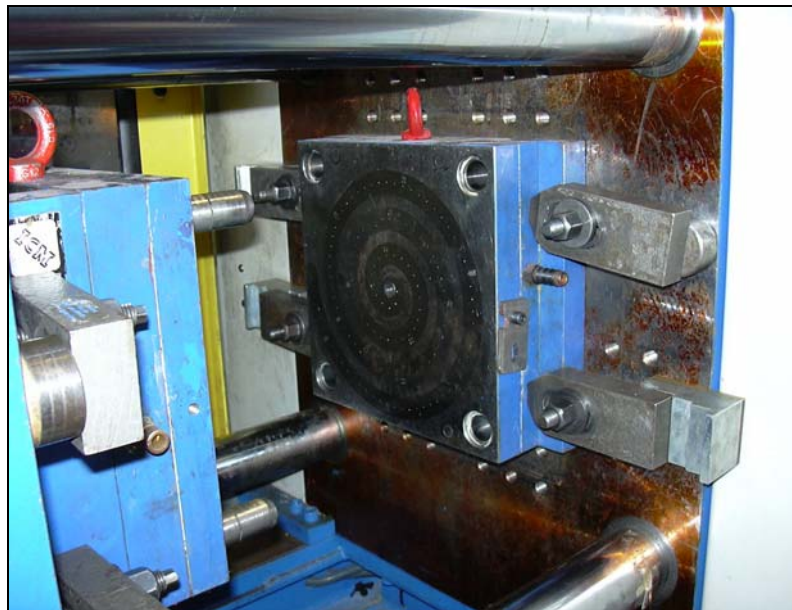


Fig. Situación de los sensores de presión en el molde espiral.

4.- Metodología de caracterización reológica desarrollada.



Las dimensiones exteriores del molde son de 250x250mm, y el aro centrador del bebedero tiene un diámetro exterior de 125mm.



En la imagen se observa el lado fijo del molde, con la chaveta y la salida de un canal de refrigeración en el lateral que se aprecia en la imagen. En el interior del molde se aprecian las marcas con la longitud de la espiral registrada y los alojamientos para los sensores de presión



En la imagen, el lado móvil del molde en el que se aprecia la salida del otro canal de refrigeración, y en el interior del molde, la huella de la figura y los expulsores repartidos a lo largo de la longitud de la espiral, para asegurar su expulsión del molde una vez finalizado el ciclo de inyección.



Fig. Refrigeración del molde. Ancho del canal 11mm.

CADENA DE MEDIDA

La cadena de medida está compuesta por varios instrumentos que permiten registrar los valores de presión que se alcanzan en puntos concretos de la pieza durante la inyección, desde los sensores de presión que se colocan en el interior del molde en contacto con la cavidad, hasta el ordenador que permite recoger y visualizar los resultados registrados

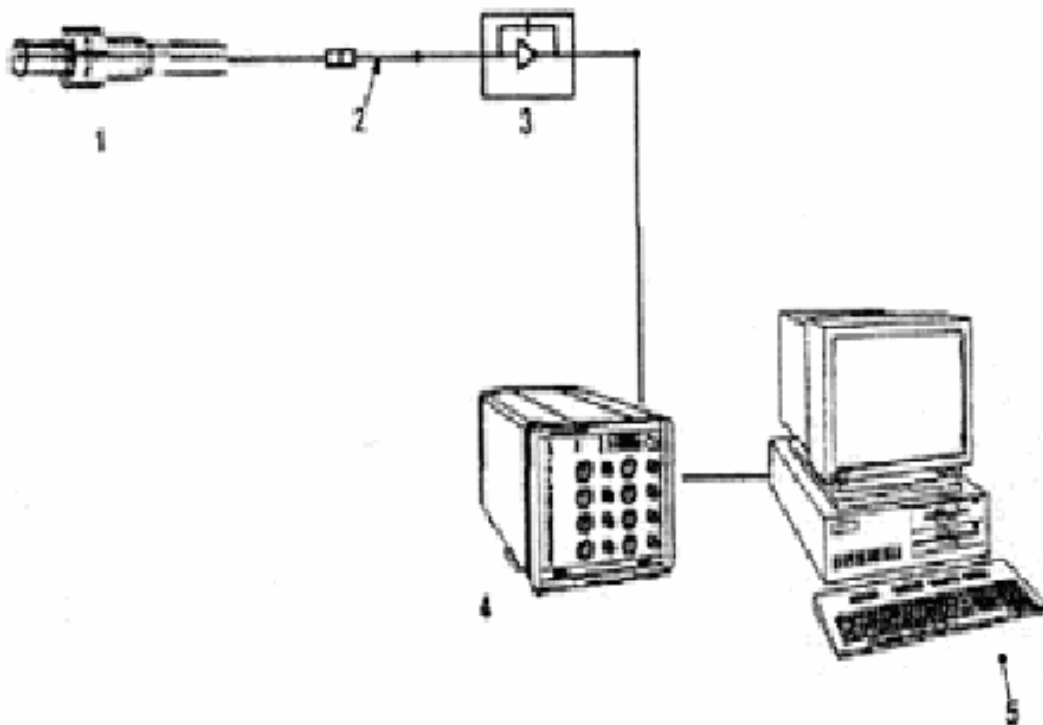


Fig. Cadena de medida. 1 transductor de presión; 2 cable de conexión; 3 amplificador; 4 adaptador; 5 ordenador.

En la imagen anterior se puede observar un esquema de los elementos que conforman la cadena de medida. Permiten transformar los valores de presión registrados por los sensores en el interior del molde a un formato más sencillo de utilizar a través del ordenador.

SENSORES DE PRESIÓN

Los sensores utilizados para registrar la presión en la cavidad son sensores piezoeléctricos de cuarzo, debido a sus propiedades físicas, transforman esta presión en una señal eléctrica. Son sensores muy robustos y tienen un amplio alcance de frecuencia (por encima de los 100 Khz.) y alta resolución

El efecto piezoeléctrico es una propiedad de ciertos materiales, que bajo la aplicación de cargas mecánicas externas, establecen campos eléctricos.

Esta propiedad es característica de materiales con estructuras cristalinas complejas, que tienen un bajo grado de simetría, como por ejemplo: titanatos de bario y plomo, circonato de plomo (PbZrO_3), el fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) y el cuarzo.

Los sistemas de medición piezoeléctricos son sistemas eléctricos activos. Es decir, los cristales producen una salida eléctrica solamente cuando experimentan un cambio en la carga externa. Por esta razón, no pueden realizar medidas estáticas fieles. Sin embargo, son capaces de registrar variaciones de presión de alta frecuencia. Para medir variables estáticas o con una variación pequeña en el tiempo se utilizan sensores piezorresistivos (la resistencia eléctrica varía con la deformación).

Los aparatos de medición piezoeléctricos se utilizan en aquellos usos que requieren la medición y el registro exactos de cambios dinámicos en variables mecánicas tales como presión, fuerza y aceleración.

Muchas aplicaciones, como la detección automática del llenado volumétrico, requieren frecuencias de muestreo superiores a 1 Khz., obteniéndose buenos resultados con sensores piezoeléctricos.

Existen dos métodos diferentes, a través de los cuales el sensor es capaz de medir la presión en cavidad;

- método de medida directa.
- método de medida indirecta.

Si el sensor realiza la medida por el método de medida directa, este se encuentra en contacto directo con el material plástico, y se obtiene la medida de presión directamente. La medida que se obtiene es muy precisa y permite colocar el sensor en la posición más idónea en el interior de la cavidad, aunque para ello es necesario mecanizar el molde.

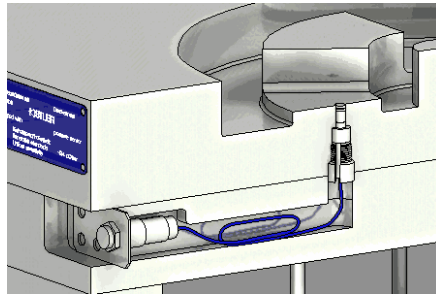


Fig. Sensor de medida directa colocado en el molde.

Si por el contrario, el sensor elegido realiza la medida de forma indirecta, este mide la fuerza ejercida por el plástico detrás de un expulsor, y a partir del diámetro del expulsor, se conoce la presión en cavidad. Este tipo de sensores son más inexactos debido a posibles problemas de pandeo en el molde y rozamiento del expulsor. Son utilizados cuando no hay espacio suficiente en el molde para colocar un sensor de medida directa.

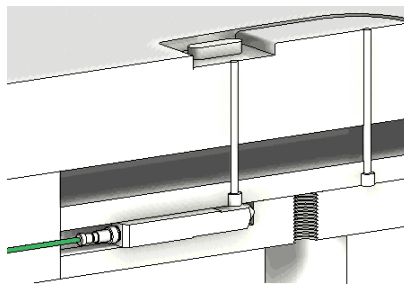


Fig. Sensor de medida indirecta colocado detrás de un expulsor

Los sensores de presión utilizados para este estudio son de medida directa, debido a la precisión que se requiere en los valores de presión que se obtengan.

Son unos KISTLER 6157BBSP0 que tienen las siguientes características técnicas;

- Son sensores de cuarzo de presión para cavidades, específicos para el moldeo de inyección de plásticos.
- Apto para materiales abrasivos.
- Rango de temperatura de operación de molde (sensor, cable y conector) hasta 300° C.
- Rango de temperatura de operación del fundido (en la parte frontal del sensor) hasta 450° C.
- Cable de conexión mallado, de acero inoxidable y de 2 m de longitud.
- Rango de presión de operación hasta 2000 bar.
- Sensibilidad -4 pC/bar.
- Coeficiente de temperatura de sensibilidad +/- 0,01 %/° C.
- Frecuencia natural >100 kHz
- Resistencia aislante; a 20° C >100 TΩ
a 300° C <0,01 TΩ

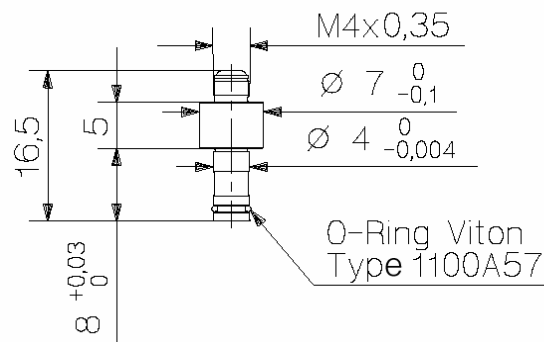


Fig. Dimensiones de la cabeza del sensor que se aloja en la cavidad del molde.

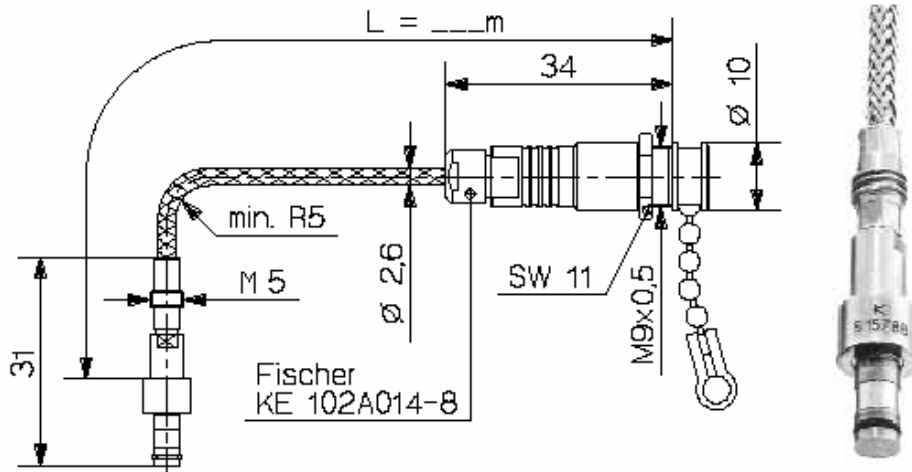


Fig. Especificaciones técnicas en cuanto al guiado del cable por el interior del molde.

Los sensores están situados en el lado fijo del molde, y para colocarlos es necesario desmontar la placa de amarre del lado fijo del molde. Con el instrumental adecuado se colocan los sensores en las cavidades preparadas específicamente para ellos.



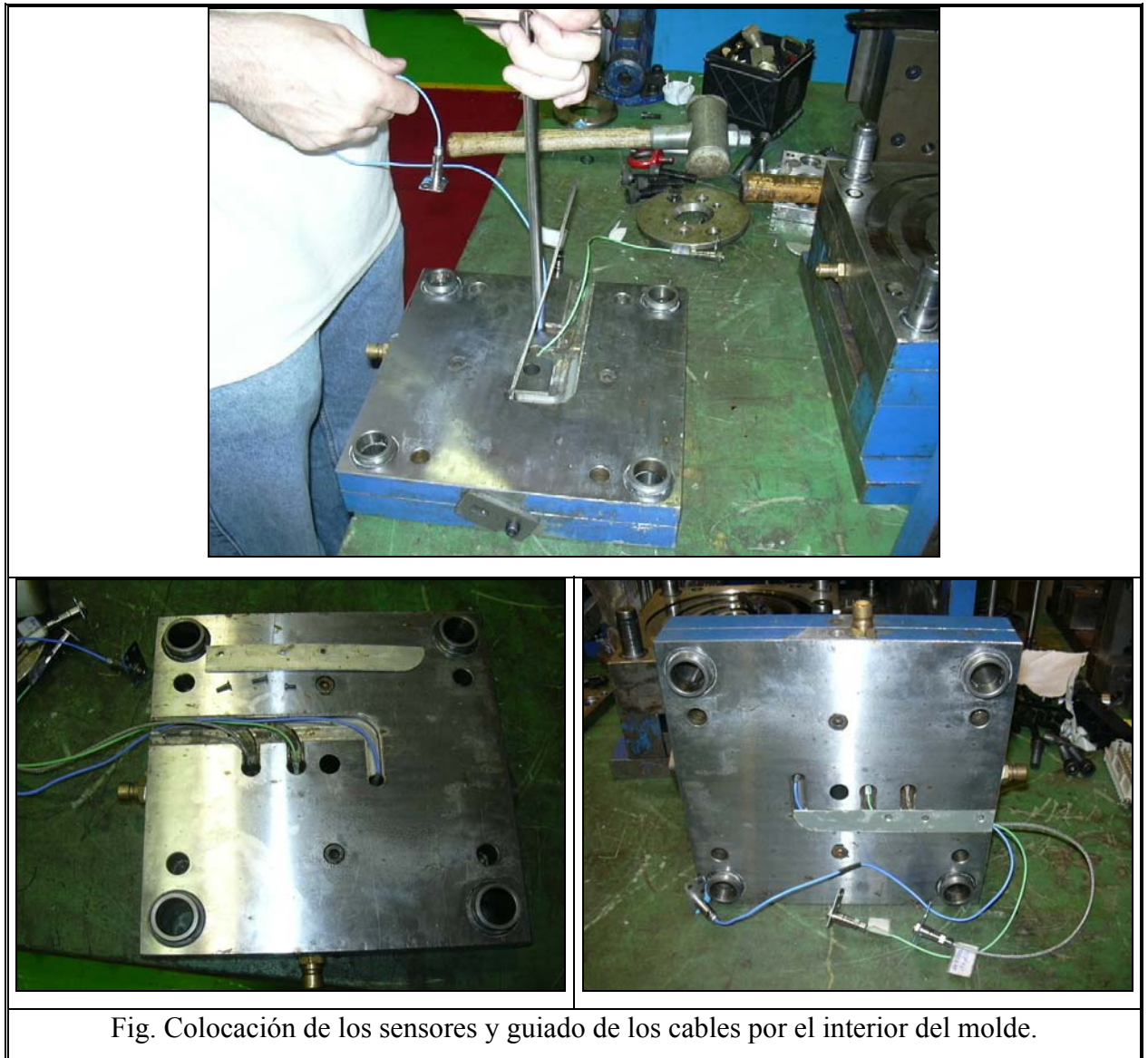


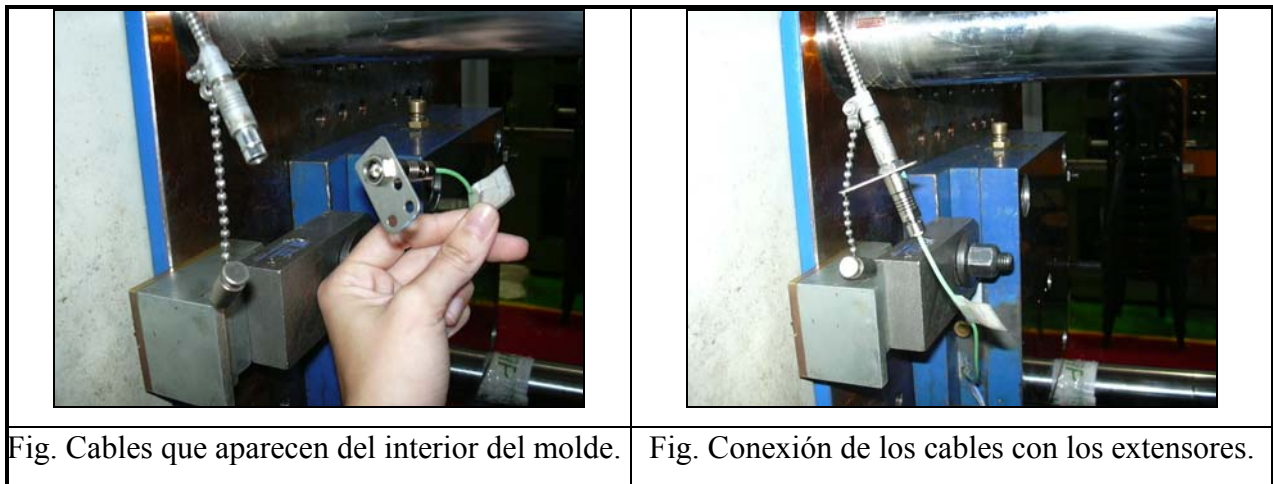
Fig. Colocación de los sensores y guiado de los cables por el interior del molde.

CONEXIONES Y AMPLIFICADORES

Desde el interior de la cavidad del molde, hasta el ordenador donde se visualizan los valores registrados durante la inyección, se sitúan varios elementos de la cadena de medida.

Por uno de los laterales del lado fijo del molde, salen los cables que conectan con los sensores en el interior del molde.

Estos cables se conectan con otros cables extensores, que permiten alcanzar una zona de trabajo más segura y estable, que permita situar los amplificadores.





Cada cable extensor, que está conectado a un sensor de presión, se conecta con un amplificador, que tiene una salida de señal modificada hacia el digitalizador.



Fig. Amplificador con los cables de entrada y salida de señal.



El cable de salida del amplificador tiene una doble salida con la que se conecta al digitalizador.

	
<p>Fig. Doble salida para el cable que sale del amplificador.</p>	<p>Fig. Imagen del digitalizador en el que se conectan las dos salidas del cable proveniente del amplificador.</p>

El digitalizador o adaptador, convierte la señal analógica recibida del amplificador para que pueda ser leída por el ordenador.

Tiene varias conexiones

- Una toma de tierra que se conecta a la toma de tierra de la máquina de inyección.
- Una conexión a la red eléctrica para su funcionamiento.
- Una conexión con el ordenador.

	
<p>Fig. Toma de tierra del digitalizador unido a la toma de tierra de la máquina.</p>	<p>Fig. Conexiones por la parte posterior del amplificador, a la red eléctrica y al ordenador.</p>

La conexión del digitalizador con el ordenador permite visualizar los valores de presión registrados por la cadena de medida.

ORDENADOR

Con el ordenador y mediante un programa informático, DFPLUS, podemos recoger y visualizar de forma gráfica los valores de presión obtenidos durante el proceso de inyección.

Inicialmente, antes de comenzar las pruebas de inyección y después de haber accedido al programa, es necesario crear o cargar una configuración del proceso, canales y rangos de medida con los que se van a realizar las pruebas de inyección.

Primero se definen los parámetros de adquisición;

- canales que van a realizar medidas.
- numero de ciclos de inyección que se van a realizar en cada medida.
- tasa de muestreo (numero de valores que se recogen cada segundo).
- tiempo de duración de cada muestreo.
- tiempo de espera entre la señal del trigger y el comienzo de la adquisición de datos.
- forma en la que se da la señal de que de comienzo cada una de las medidas.

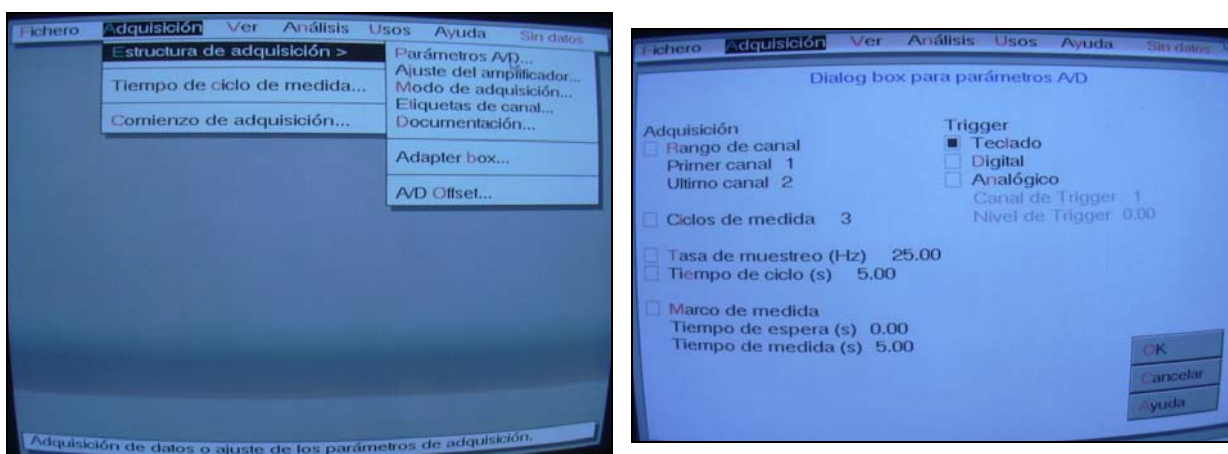


Fig. Condiciones en las que se realiza la adquisición de datos

De la misma manera que se ajustan las condiciones en las que se realiza la toma de datos, se deben introducir las características técnicas de los amplificadores que se utilizan.

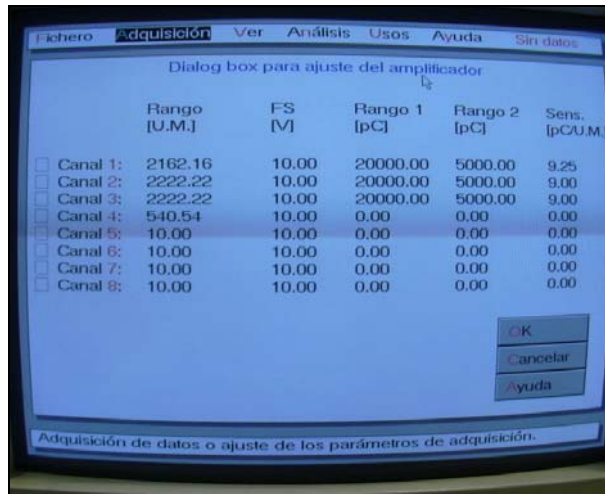
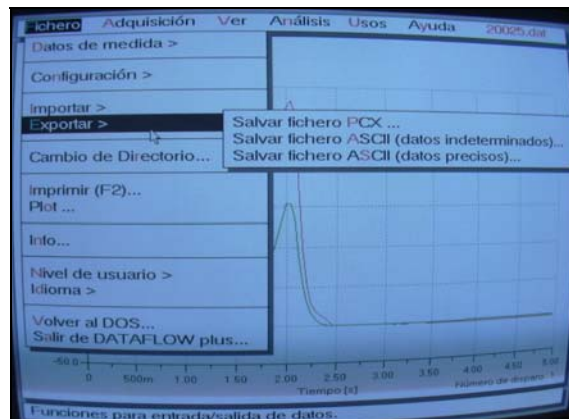


Fig. Ajuste de las características de los amplificadores utilizados.

Después de que el programa esté configurado para la adquisición de datos, se puede proceder a realizar los ensayos de inyección.

Los valores de presión medidos por cada sensor y que el programa recoge durante la inyección, se presentan en la pantalla nada mas terminar cada ciclo de medida y al finalizar todos ciclos de un ensayo.

El programa permite guardar los valores recogidos como tablas de datos y como gráficas.



MAQUINA DE INYECCIÓN

La máquina de inyección utilizada para los ensayos ha sido una JSW J85 ELIII eléctrica, que se encuentra ubicada en las instalaciones de Fundación AITIIP, y que se adapta en tamaño y fuerza de cierre al molde espiral con el que se han realizado las pruebas de inyección.



Fig. Imagen de la máquina en la que se van a realizar los ensayos.

A través del monitor de la máquina se controlan: los movimientos del carro, los movimientos de apertura, cierre y expulsión del molde y los parámetros de proceso que determinan las condiciones en las que se realiza la inyección.

En el siguiente cuadro se recogen las características principales de la máquina utilizada para realizar las pruebas de inyección, y que determinan si es posible o no la inyección de un determinado molde.

Características de la máquina.

JSW J85 ELIII ELECTRICA

CIERRE	Fuerza de cierre		TN	85
	Espesor de molde	Mínimo	mm	180
		Máximo	mm	350
	Carrera máxima de apertura		mm	650
	Tamaño de los platos Hp x Vp		mm	530x530
	Paso entre columnas H x V		mm	360x360
	Sistema de cierre			eléctrico
	Numero de noyos			0

INYECCIÓN	Diámetro del husillo		mm	32
	Presión máxima de inyección		Bar	2000
	Volumen teórico de inyección		cm ³	97
	Caudal de inyección teórico		cm ³ /s	188
	Capacidad de plastificación		cm ³ /s	17
	Tipo de boquilla			Abierta

PERIFÉRICOS Y OTROS	Control de inyección con gas, equipos disponibles para 4 vías.		
	Inyección – Compresión Máquina de accionamiento servo eléctrico, dotada de software específico para la inyección compresión, conforming, inyección a baja presión.		
	Inyección asistida con agua		
	Programa para inyección secuencial mediante autómatas externos		

4.2.- APLICACIÓN Y AJUSTE DE LOS MEDIOS NECESARIOS

PUNTOS ÓPTIMOS PARA LOS SENSORES DE PRESIÓN.

El método que va a ser utilizado para el cálculo de las curvas de viscosidad de los materiales analizados consiste en medir la caída de presión que se produce entre dos puntos del molde espiral, a una temperatura y velocidad de inyección determinada. Como se observa en las ecuaciones obtenidas en apartados anteriores, la temperatura del material es una propiedad que afecta directamente a los valores de viscosidad calculados.

Los sensores que se van a utilizar para realizar los ensayos solo miden presión, por lo que la temperatura a la que el material alcanza los puntos de análisis se supone que es la temperatura de inyección, es decir, que el material no se enfría ni se calienta desde que sale del husillo hasta que alcanza los dos sensores.

Para que este sistema de cálculo de curvas de viscosidad aproximado sea coherente, ha de suponerse inicialmente que la diferencia de temperatura que tiene el material en los dos puntos en los que se colocan los sensores de presión, es mínima.

La diferencia de temperatura entre esos dos puntos de medida, se analiza previamente a realizar los ensayos, para así poder evaluar inicialmente la validez del método o no. La temperatura en cada punto durante la inyección se comprueba por medio de un programa de simulación de inyección, Moldflow.

Los factores que afectan directamente a que el material varíe su temperatura, es decir, se caliente o se enfríe, son la distancia de los puntos al punto de inyección, la distancia entre ellos, y la velocidad de inyección.

Si los sensores no están próximos al punto de entrada, y próximos entre si, el material puede enfriarse, por lo que reduce la precisión de los resultados obtenidos.

El mismo efecto se obtiene con la velocidad de inyección. Si esta es muy baja, el material tarda en llegar a los puntos de análisis y se enfría. Si la velocidad de inyección es muy alta, la cizalla del material con el molde puede provocar que este aumente de temperatura sobre la determinada en el husillo.

Se simula la inyección del molde espiral, con unos parámetros de proceso similares a los que van a ser utilizados en máquina. De los resultados obtenidos se analiza la evolución de la temperatura en los puntos correspondientes a la posición de los sensores.

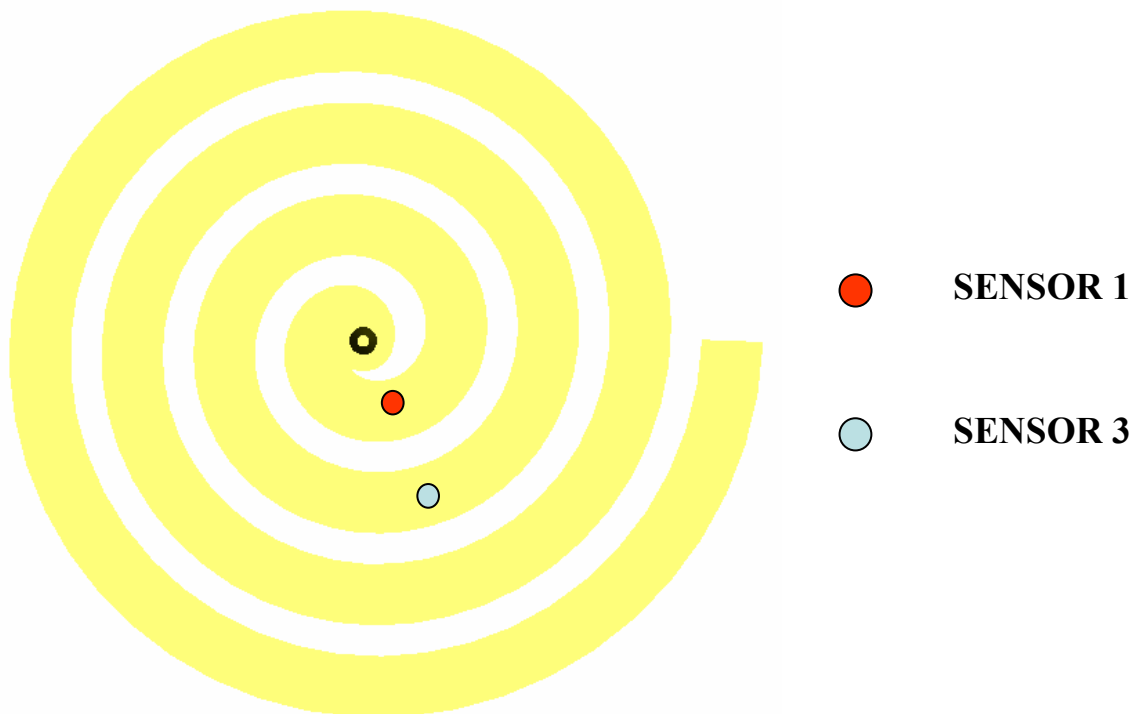


Fig. Imagen de los sensores 1 y 3 en el molde espiral.

Para realizar las simulaciones de inyección es necesario fijar previamente unas condiciones de proceso, temperatura del material, caudal de inyección ya que vamos a trabajar con un programa de simulación de inyección y la presión de inyección a la que se produce el cambio de llenado a compactación.

A continuación se realizan una secuencia de casos de simulación de inyección, variando cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

Para cada caso de simulación se mide el salto térmico que se produce entre los dos nodos que coinciden con los sensores de presión en el molde. Si los valores que se obtiene se encuentran dentro de unos límites establecidos, se podrá determinar que los resultados experimentales que se pueden obtener con este método de trabajo son válidos.

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 190° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 3 (°C)	ΔT (°C)
12	184,9	188,7	-3,8
20	194,1	188,3	5,8
40	191,1	197,2	-6,1
60	192,3	198,3	-6
90	192,2	198,9	-6,7
180	195,2	198,5	-3,3

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 223° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 3 (°C)	ΔT (°C)
12	215	219,5	-4,5
20	219,6	224,5	-4,9
40	228,1	223,1	5
60	224,4	229,3	-4,9
90	225,2	230,2	-5
180	231	227	4

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 257° C			
Caudal (cm ³ /s)	T 1 (°C)	T 3 (°C)	ΔT (°C)
12	247,6	250,9	-3,3
20	251,8	256,7	-4,9
40	256,2	260,8	-4,6
60	257,4	262,1	-4,7
90	258,5	263,2	-4,7
180	260,2	264,3	-4,1

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 290° C			
Caudal (cm ³ /s)	T 1 (°C)	T 3 (°C)	ΔT (°C)
12	278	281.9	-3.9
20	283.3	288.2	-4.9
40	287.9	292.6	-4.7
60	289.7	294.3	-4.6
90	290.7	295.4	-4.7
180	292.6	296.6	-4

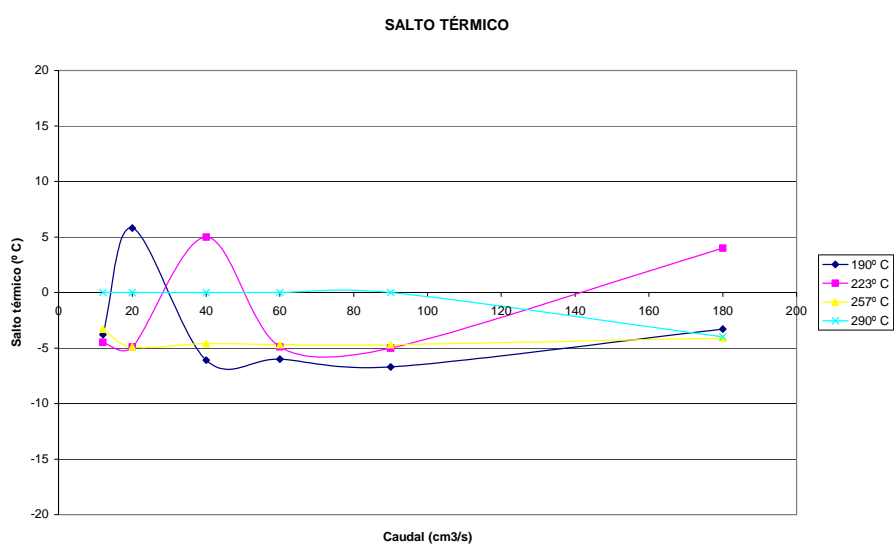


Fig. Representación gráfica de los valores de salto térmico obtenidos para cada temperatura ensayada.

Tras analizar los resultados expuestos anteriormente, se observa que el salto mínimo de temperatura que se obtiene entre los dos sensores es de 3,3 °C, valor que se considera demasiado alto para considerar los resultados fiables.

Se determina que no debe haber una diferencia térmica entre los puntos donde se sitúan los sensores de más de 2°C. Para poder cumplir esta condición de validación de resultados es necesario introducir un nuevo sensor en una posición más cercana al primer sensor. Con este nuevo sensor, el enfriamiento del material en los puntos de recogida de datos será menor.

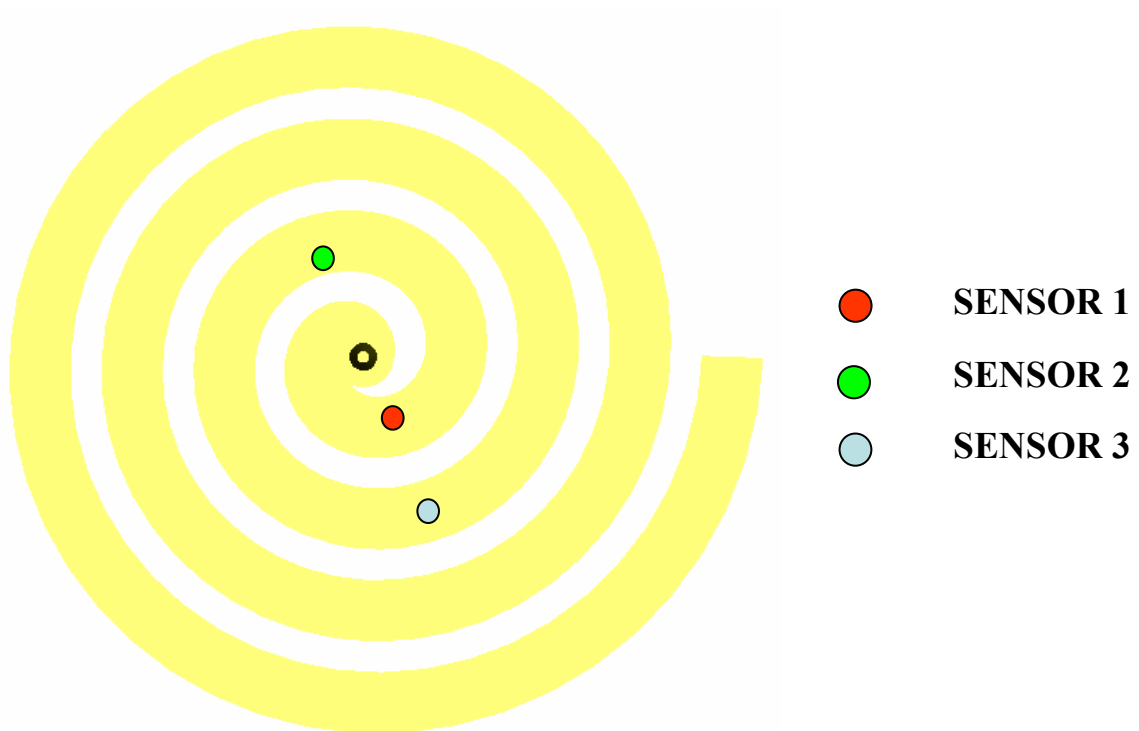
MODIFICACIÓN DEL MOLDE

Para que el método de cálculo pueda ser considerado válido y se cumpla la premisa de que el salto térmico entre los puntos de análisis no debe ser mayor de 2° C, debemos buscar una nueva posición en el molde espiral para colocar el segundo transductor.

La nueva posición debe estar más próxima a la posición del primer transductor, que la posición actual.

Antes de modificar el molde, que es una operación costosa y que no tiene vuelta a tras, se busca una posición óptima para el segundo transductor mediante simulaciones de inyección.

En la siguiente imagen se presenta el punto elegido para el estudio de simulación como posible nueva posición para el segundo sensor de presión. Una posición intermedia entre los sensores de presión iniciales.



Se recogen de nuevo los resultados de las simulaciones de inyección realizadas, pero en este caso, en los resultados se analiza la nueva posición elegida para el segundo transductor de presión.

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 190° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 2 (°C)	ΔT (°C)
12	184,9	188,7	-3,8
20	188,3	194,1	-5,8
40	191,1	197,2	-6,0
60	192,3	198,3	-6,0
90	192,2	198,9	-6,7
180	195,2	198,5	-3,3

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 223° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 2 (°C)	ΔT (°C)
12	222,67	223,89	-1,22
20	222,67	223,89	-1,22
40	224,17	224,75	-0,58
60	225,75	228	-2,25
90	226,42	228,7	-2,28
180	227,02	226,55	0,47

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 257° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 2 (°C)	ΔT (°C)
12	250,44	250,44	0
20	254,48	257,05	-2,57
40	257,14	258,07	-0,93
60	258,09	258,75	-0,66
90	258,89	259,28	-0,39
180	260,44	259,65	0,79

TEMPERATURA DEL MATERIAL: 290° C			
Caudal (cm³/s)	T 1 (°C)	T 2 (°C)	ΔT (°C)
12	281,18	280,07	1,11
20	286,33	289,7	-3,37
40	289,59	290,98	-1,39
60	290,66	291,65	-0,99
90	291,55	292,11	-0,56
180	293,02	292,55	0,47

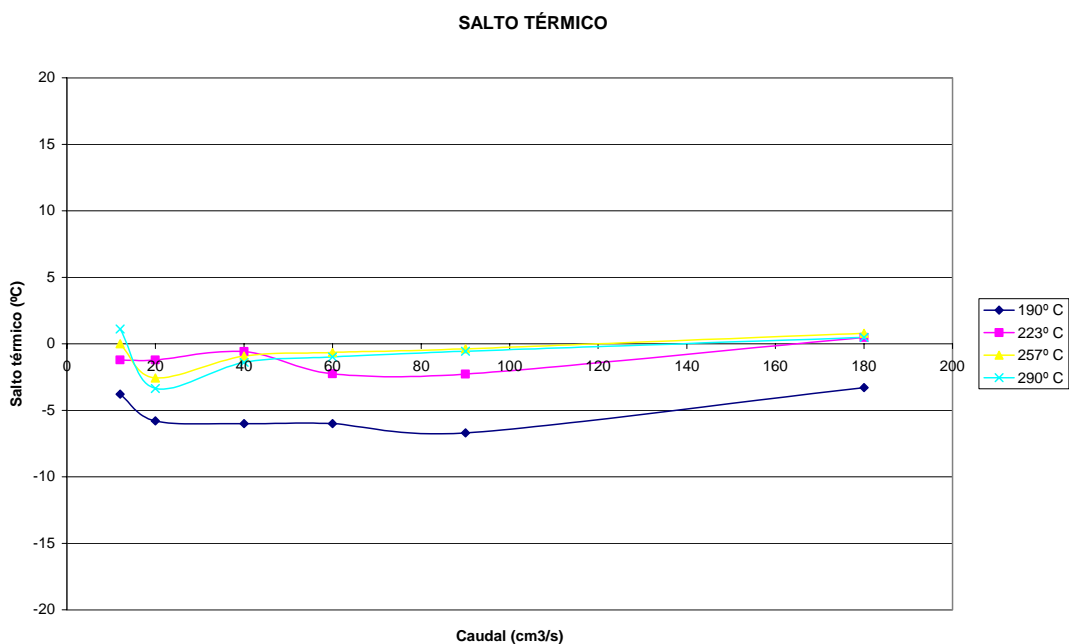


Fig. Representación gráfica de los valores de salto térmico obtenidos para cada temperatura ensayada.

De los resultados obtenidos de la simulación se puede extrapolar que para las temperaturas de inyección analizadas, que se corresponden con las del rango de inyección del material a utilizar en los ensayos, el salto térmico que se produce entre el primer sensor y la nueva posición del segundo sensor no es superior a los 2° C.

Utilizando en los ensayos experimentales la nueva posición analizada para el segundo transductor, el método de análisis inicialmente es válido.

El siguiente paso es la modificación del molde, es necesario habilitar un encaje para el segundo transductor en la nueva posición elegida y analizada mediante el programa de simulación de inyección.

Para la modificación del molde es necesario tener en cuenta el diseño del mismo, no debe interferir en los canales de refrigeración para así reducir al máximo el coste de tiempo y económico de la modificación.



Como se ve en la imagen, la posición determinada para el nuevo sensor no interfiere con los canales de refrigeración del lado fijo.



Fig. Posición inicial de los sensores de presión.



Fig. Nueva posición para el segundo sensor de presión

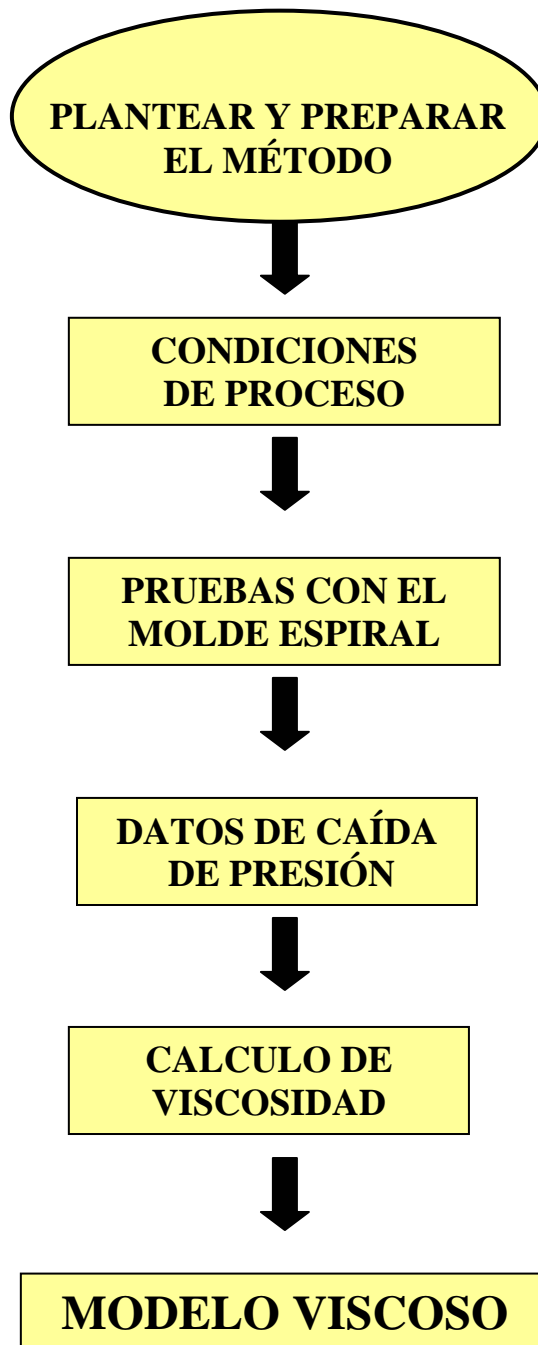
4.3.- CÁLCULO DEL MODELO VISCOSO EQUIVALENTE

El objetivo de este estudio es el de desarrollar un método de trabajo, que permita el cálculo de modelos viscosos aproximados, mediante un proceso de trabajo industrial, a partir de registros de presión recogidos del molde espiral.

Antes de iniciar las pruebas de inyección, es necesario determinar una metodología de trabajo donde se detallen el orden y las acciones a realizar.

El esquema de trabajo que se determina consta de varias partes:

1. Determinación de las condiciones en las que se van a realizar los ensayos; temperaturas, velocidades de inyección, presión de cambio de fase...
2. Realización de las pruebas de inyección con el molde espiral, con las condiciones de temperatura, velocidad y presión previamente establecidos.
3. Análisis de los registros de presión obtenidos durante las pruebas de inyección.
4. Cálculo de los valores de viscosidad a partir de los registros de presión obtenidos.
5. Obtención del modelo viscoso del material analizado.



ECUACIONES DEL MODELO VISCOSO

Para poder realizar el cálculo de valores de viscosidad tenemos que obtener una ecuación matemática que nos relacione los distintos parámetros de los que depende la viscosidad.

Se conoce que durante el proceso de inyección, las velocidades de cizalla a las que se someten a los plásticos son muy elevadas, por lo que las interacciones entre las cadenas poliméricas se reducen según estas se van orientando en el sentido del flujo.

Si la orientación de las cadenas fuera completa, su comportamiento se podría aproximar al de un fluido newtoniano, y utilizar la ecuación de viscosidad de Newton para definir la viscosidad del polímero durante el proceso de inyección.

En este caso, vamos a utilizar esta aproximación para el cálculo de las viscosidades de los polímeros, ya que los ensayos se van a realizar con altas velocidades de cizalla.

Los valores de viscosidad se van a determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

Siendo:

- τ : Tensión de corte.
- η : Viscosidad del material.
- γ : Velocidad de cizalla.

Existe una relación directa entre las variables velocidad de cizalla y tensión de corte, con parámetros como la presión, caudal volumétrico y geometría de la conducción.

Se puede realizar el cálculo de la viscosidad mediante un molde espiral, aunque para ello es necesario realizar una aproximación, que consiste en asemejar el paso del flujo por la espiral de sección rectangular y constante, al paso del flujo que se produce a través de una placa plana.

Para el caso de una placa plana, están determinadas las relaciones entre la variables definidas anteriormente; velocidad de cizalla y tensión de corte, con los parámetros físicos.

1. **Shear rate o velocidad de cizalla**: Variable que depende de las dimensiones del paso del flujo y de las condiciones de inyección.

$$\gamma = \frac{3 \cdot Q}{4 \cdot a^2 \cdot b}$$

Siendo:

- Q; parámetro determinado por el % de velocidad utilizado para la inyección de la espiral. Se mide en m³/s.
- a; parámetro determinado por las dimensiones de la espiral, la mitad del espesor. Se mide en m.
- b; parámetro determinado por las dimensiones de la espiral, la mitad de la anchura. Se mide en m.

2. **Shear rate o tensión de corte**: Variable que depende de las dimensiones geométricas de la espiral y de las caídas de presión que se producen entre dos puntos determinados de la espiral. Estas caídas de presión se obtienen a través de los sensores de presión instalados en puntos concretos del molde, durante la inyección del mismo.

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot a}{L}$$

Siendo:

- ΔP ; Caída de presión entre dos puntos concretos de la espiral. Se mide en Pa·s.
- a; parámetro determinado por las dimensiones de la espiral, la mitad del espesor. Se mide en m.
- L; parámetro determinado por la posición de los sensores de presión en la espiral, la distancia entre los dos puntos de medida. Se mide en m.

3. **Viscosidad**: Variable que depende de la velocidad de cizalla y la tensión de corte.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{4 \cdot \Delta P \cdot a^3 \cdot b}{3 \cdot Q \cdot L}$$

A partir de esta última ecuación expuesta es posible el cálculo de valores de viscosidad de un material a través de un molde espiral, ya que relaciona la geometría del molde espiral, las condiciones de inyección y los valores de presión obtenidos tras los ensayos con valores de viscosidad.

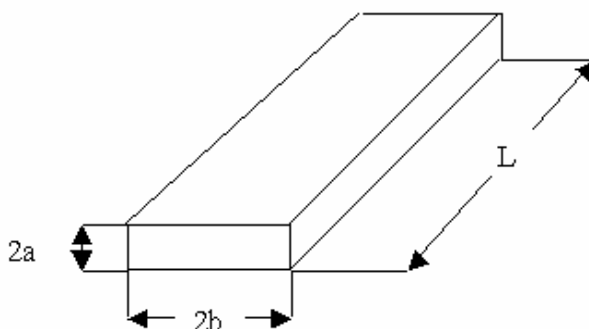


Fig. Representación geométrica de la placa plana y sus parámetros geométricos.

Cuando se realiza el cálculo de valores de viscosidad a través del molde espiral, no se aplican las correcciones que se utilizan en el caso del reómetro capilar.

La corrección de Bagley no se aplica porque no se producen cambios de sección en el flujo del plástico en las zonas próximas a donde se recogen los valores de presión.

En el caso de la corrección de Rabinowitch, tampoco se aplica porque el deslizamiento que se produce por las paredes del molde es mucho menor que el que se produce en un reómetro capilar y la modificación de los valores de viscosidad sería por debajo de un 10 %.

Esto supone que los valores de viscosidad obtenidos con las formulas definidas son válidos, y no necesitan ser corregidos como en el caso del cálculo de viscosidades mediante un reómetro capilar.

Con los valores de viscosidad obtenidos, debemos definir un modelo viscoso mediante la extrapolación de estos valores, para poder calcular valores de viscosidad independientemente de la geometría de la pieza, y de las condiciones de inyección impuestas.

Existen varios modelos matemáticos que definen la variación de la viscosidad en función de los parámetros de los que depende:

Modelo de Potencias:

La viscosidad se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = A\gamma^B \exp(CT)$$

Donde:

- η es la viscosidad en Pa·s.
- A, B y C son las constantes que definen el material.
- γ es la velocidad de cizalla en 1/s.
- T es la temperatura del material en °C.

Modelo de Carreau:

La viscosidad se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{(K_1 \cdot \alpha)}{(1 + K_2 \gamma \alpha)^{k_3}}$$

Siendo:

- $\alpha = \frac{8,86 \cdot (K_4 - K_5)}{(101,6 + K_4 - K_5)} - \frac{8,86 \cdot (T_i - K_5)}{(101,6 + T_i - K_5)}$
- η es la viscosidad en Pa·s.
- K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_5 son las constantes que definen el material.
- γ es la velocidad de cizalla en 1/s.
- T_i es la temperatura del material en °C.

A parte de estos modelos matemáticos existe una ecuación matemática que caracteriza mejor la variación de la viscosidad. Es una ecuación de segundo orden, que nos permite obtener valores de viscosidad en función de la temperatura, el caudal y las constantes propias de cada material.

Modelo de Segundo Orden:

La ecuación de un modelo viscoso de 2º orden es:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \gamma + A_2 T + A_3 \ln \gamma^2 + A_4 T \ln \gamma + A_5 T^2$$

Siendo:

- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

Cada material está caracterizado por su modelo viscoso. En el momento en el que se conocen las constantes del modelo de segundo orden o de cualquier otro modelo matemático, el material tiene la viscosidad caracterizada ya que la temperatura y la velocidad de cizalla son valores que varían en función de las condiciones en las que se encuentre el material.

Para poder calcular estas constantes, debemos primero calcular valores de viscosidad en distintas condiciones, para poder extrapolar los valores de las constantes pertenecientes a la ecuación del modelo viscoso de segundo orden.

La extrapolación se realiza mediante un programa informático llamado VISDAT, que calcula el valor de las constantes del modelo viscoso de segundo orden a partir de tríos de valores de viscosidad, temperatura y velocidad de cizalla.

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES

Conocidos los parámetros necesarios para el cálculo, y las ecuaciones matemáticas a aplicar, se deben establecer las condiciones y parámetro de proceso con los que se van a realizar las pruebas experimentales de inyección.

Las pruebas de inyección van a realizarse con un molde espiral, un tipo de molde con unas características determinadas, que implica ya de por sí, una determinada forma de trabajo.

La velocidad de inyección debe ser constante, debido a que la sección de la espiral no varía. No se realiza la fase de compactación de la pieza, solo se realiza la fase de llenado y la fase de enfriamiento del molde, debido a que se trata de un molde sin final. El final de la fase de inyección se determina por presión, es decir, la máquina inyectora material en las condiciones impuestas hasta que alcanza una presión determinada en los controles de la máquina.

Por todas estas características especiales del molde y de la forma de realizar la inyección, la longitud de la espiral dependerá de las condiciones de inyección. En función de los parámetros de proceso la longitud de la misma será mayor o menor.

Algunos de los parámetros de proceso, afectan directamente a las suposiciones de comportamiento que hemos establecido inicialmente para el cálculo de la ecuación del modelo viscoso. Por lo tanto, son parámetros que deben ser determinados cuidadosamente para no contradecir las premisas iniciales.

Presión máxima de inyección o presión de corte

La determinación de este valor no afecta directamente a los planteamientos iniciales realizados para la obtención del modelo viscoso, pero afecta directamente a la ejecución propia de las pruebas de inyección. Su elección correcta garantiza uniformidad y coherencia entre las pruebas de inyección.

Se debe determinar un valor de presión máxima de inyección, que permita que finalice la fase de llenado, después de que el material plástico a analizar, haya sobrepasado el segundo sensor, para las condiciones de temperatura y velocidad más desfavorables que se impongan. Hay que recordar que debido a las características concretas del molde y de su proceso de inyección, la longitud de la espira no es siempre la misma, sino que depende de las condiciones de inyección impuestas.

La presión de corte debe ser aquella que asegura una longitud mínima de espiral en cualquier condición de proceso.

Temperatura

El cálculo de la ecuación del modelo viscoso de un material, se realiza a través de la extrapolación de una tríada de datos que se obtienen de los ensayos experimentales., temperatura, viscosidad y velocidad de cizalla. Para que el programa “VISDAT”, pueda realizar la extrapolación y calcular las constantes del modelo viscoso, son necesarios un número mínimo de valores.

Con respecto al parámetro de la temperatura, son necesarias como mínimo tres temperaturas diferentes, ya que la separación de las curvas en función del aumento de la temperatura no es proporcional.

Las temperaturas elegidas para la realización de los ensayos deben abarcar el mayor abanico posible, siempre que estén dentro del rango recomendado para la inyección, ya que sino el ensayo y los parámetros elegidos para realizarlo no serían coherentes.

A parte de tener que estar dentro del rango de temperaturas recomendadas por el fabricante del material, los valores de temperatura elegidos deben cumplir que la diferencia de temperatura que tiene el material en los dos puntos en los que se colocan los sensores de presión, sea menor de 2° C, tal y como se explica mas ampliamente en el apartado 4.2.

La diferencia de temperatura entre los dos puntos de medida del molde depende de; la distancia entre los puntos donde se colocan los sensores de presión, la temperatura del material y de las velocidades a las que este se inyecte.

La distancia entre los puntos donde se realiza la medida es un parámetro que ha sido fijado y optimizado en el apartado anterior, en el 4.2. “Aplicación y ajuste de los medios necesarios”, por lo que no es una variable en el desarrollo del método de caracterización.

Los valores de temperatura y velocidad de inyección a los que se van a realizar los ensayos deben validarse previamente. La validación se puede realizar mediante simulaciones de inyección con un material análogo al que se va a utilizar en el ensayo, comprobar que la diferencia de temperatura entre los puntos de análisis no es superior a dos 2° C y así validar los valores previamente elegidos como adecuados, para realizar los ensayos de caracterización el material.

Velocidades de inyección

Al igual que sucede para la temperatura, es necesario determinar varias velocidades de inyección a las que se van a realizar las pruebas, para tener varios puntos de la curva correspondiente a cada temperatura. Así se puede asegurar que la extrapolación de los valores obtenidos de los ensayos para el cálculo de las constantes, se pueda realizar correctamente.

Las velocidades de inyección elegidas para la realización de los ensayos, como se ha explicado anteriormente, deben ser validadas al igual que la temperatura antes de de realizar las pruebas de inyección mediante simulaciones de inyección.

Por otro lado, las velocidades de inyección en valor absoluto no se pueden determinar a priori. La máquina de inyección tiene unos rangos de velocidades de inyección, un máximo y un mínimo de caudal que la máquina es capaz de suministrar. El control de la máquina trabaja en valores relativos a ese rango de trabajo de la máquina, en porcentaje de la velocidad máxima de la máquina. Antes de comenzar las pruebas, se debe calcular mediante unos ensayos iniciales, la correspondencia aproximada entre las velocidades de inyección validadas junto con los valores de temperatura, con los porcentajes de caudal que trabaja la máquina de inyección.

Por otro lado, la velocidad de inyección no es un parámetro preciso, como luego comprobaremos al observar las gráficas de presión obtenidas en los ensayos, este valor puede variar ligeramente en función del resto de los parámetros del proceso.

Nos interesa abarcar el mayor rango posible de velocidades, para así obtener valores de viscosidad en el mayor rango posible, siempre que se cumpla la condición de que entre los puntos donde se realizan las medidas no se produzca una diferencia de temperatura superior a 2° C.

Para tener una referencia de los valores de Shear Rate de trabajo que se obtienen con la máquina MATEU-SOLE de 55 Ton, maquina disponible en las instalaciones del TIIP y con las que se desarrollo inicialmente el método propuesto, se presenta la siguiente tabla.

% v	S. RATE (medio) (s ⁻¹)
25	900
50	2100
75	3000
100	3750

REGISTROS DE PRESIÓN

Con las condiciones de proceso; temperatura, presión máxima y velocidad de inyección determinadas, se realizan las pruebas de inyección. De cada una de las espirales inyectadas se analizan todos los valores recogidos por cada uno de los sensores.

Los valores que se recogen y se analizan de cada espiral son: la evolución de la presión en dos puntos diferentes de la pieza durante un periodo de tiempo determinado.

Los resultados se pueden extraer del programa que recoge la señal de los sensores de dos maneras diferentes. Uno en forma de fichero de texto, donde se recogen parejas de valores numéricos correspondientes a cada valor de presión detectado en el instante de tiempo correspondiente. Otro en forma de gráfica, donde aparecen representados los valores de presión recogidos frente al tiempo durante el cual se ha realizado la recogida de valores.

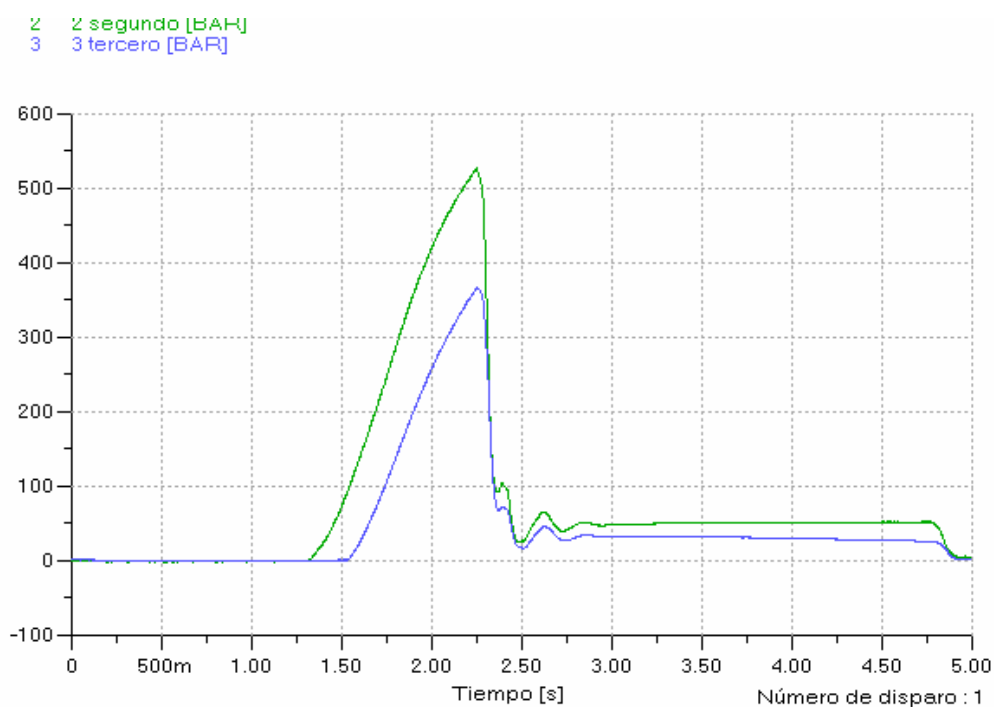


Fig. Gráfica en la que se representan los valores de presión frente al tiempo de muestreo, recogidos por los sensores, en unas condiciones de inyección determinadas.

Para poder realizar el cálculo de la viscosidad en unas determinadas condiciones, es necesario conocer la caída de presión que se produce entre dos puntos de la pieza, tal y como se ha podido observar en las ecuaciones matemáticas obtenidas para poder realizar los cálculos. Esta es la parte fundamental del método que se va a aplicar.

La caída de presión que se produce entre dos puntos no es constante a lo largo de tiempo en el que se realiza la prueba, ya que el material inyectado se va enfriando, aumenta la capa fría que reduce la sección de paso en el interior del molde y eso afecta directamente a la diferencia de presión entre dos puntos.

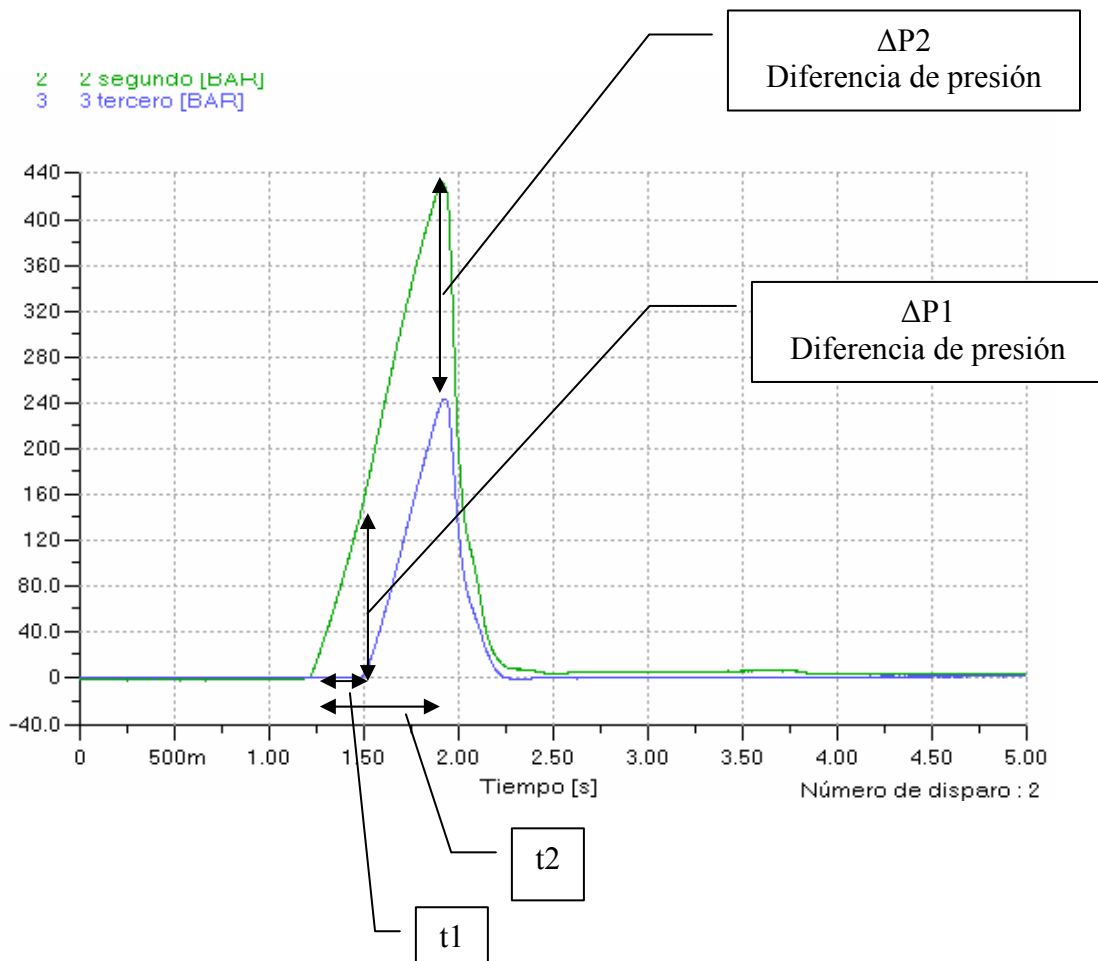


Fig. Gráfica de que presenta la evolución de la presión durante la inyección en los dos sensores que hay colocados dentro del molde.

T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO 1 (s)	ΔP1 (Bar)	TIEMPO 2 (s)	ΔP2 (Bar)
220	25	0,21	62	0,64	94
	50	0,11	70,5	0,27	93
	75	0,07	76	0,1	90
	100	0,06	74	0,09	83
240	25	0,2	55	0,7	89
	50	0,11	63	0,3	87
	75	0,08	67	0,16	81
	100	0,07	69	0,13	78
260	25	0,21	51	0,78	85
	50	0,1	58	0,34	83
	75	0,08	59,5	0,19	79
	100	0,06	62,5	0,13	73

Para que los resultados obtenidos tengan la mayor fiabilidad posible, se determina que la diferencia de presión entre dos puntos debe obtenerse en el momento en el que material llega al segundo sensor. Es el momento en el que la diferencia de temperaturas entre ambos puntos es menor, el momento en el que la capa fría es de menor espesor.

Por otro lado, la diferencia de presión no es el único parámetro que se obtiene de los registros de presión. El tiempo que tarda el plástico en avanzar del primer al segundo sensor, junto con el volumen que hay de plástico entre los dos sensores, nos permite calcular el caudal de inyección.

Para una misma velocidad de inyección, el tiempo y por lo tanto el caudal, varía en función de las condiciones de proceso con las que se hayan realizado las pruebas. Por eso es un valor que se determina al igual que la diferencia de presión, para cada una de los ensayos que se realizan.

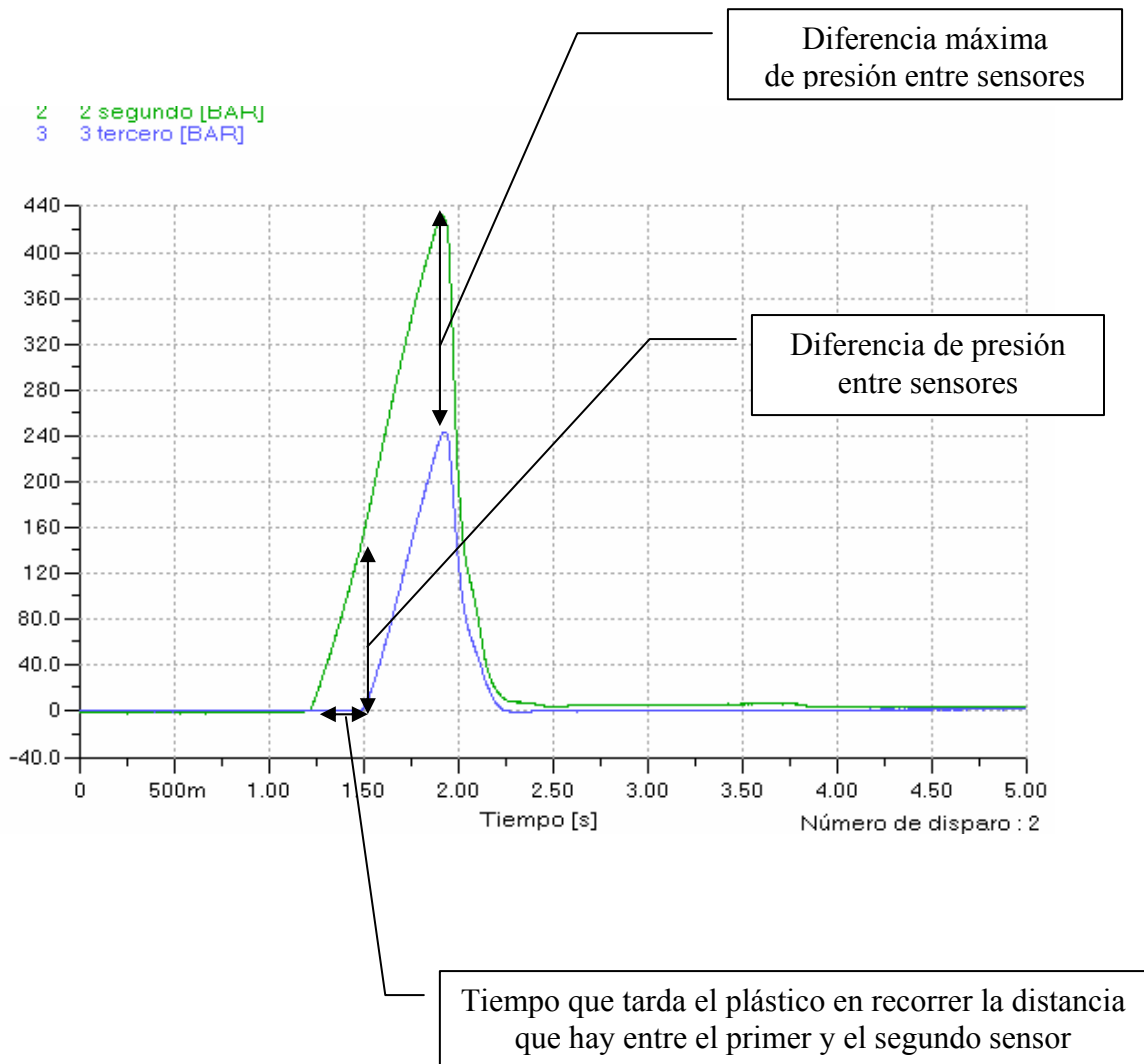


Fig. Gráfica de que presenta la evolución de la presión durante la inyección en los dos sensores que hay colocados dentro del molde.

TABLAS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de inyección obtenidos, se manejan y transforman mediante tablas que permiten aplicar las ecuaciones matemáticas determinadas en apartados anteriores, para realizar el cálculo de la viscosidad del material para cada ensayo de inyección realizado.

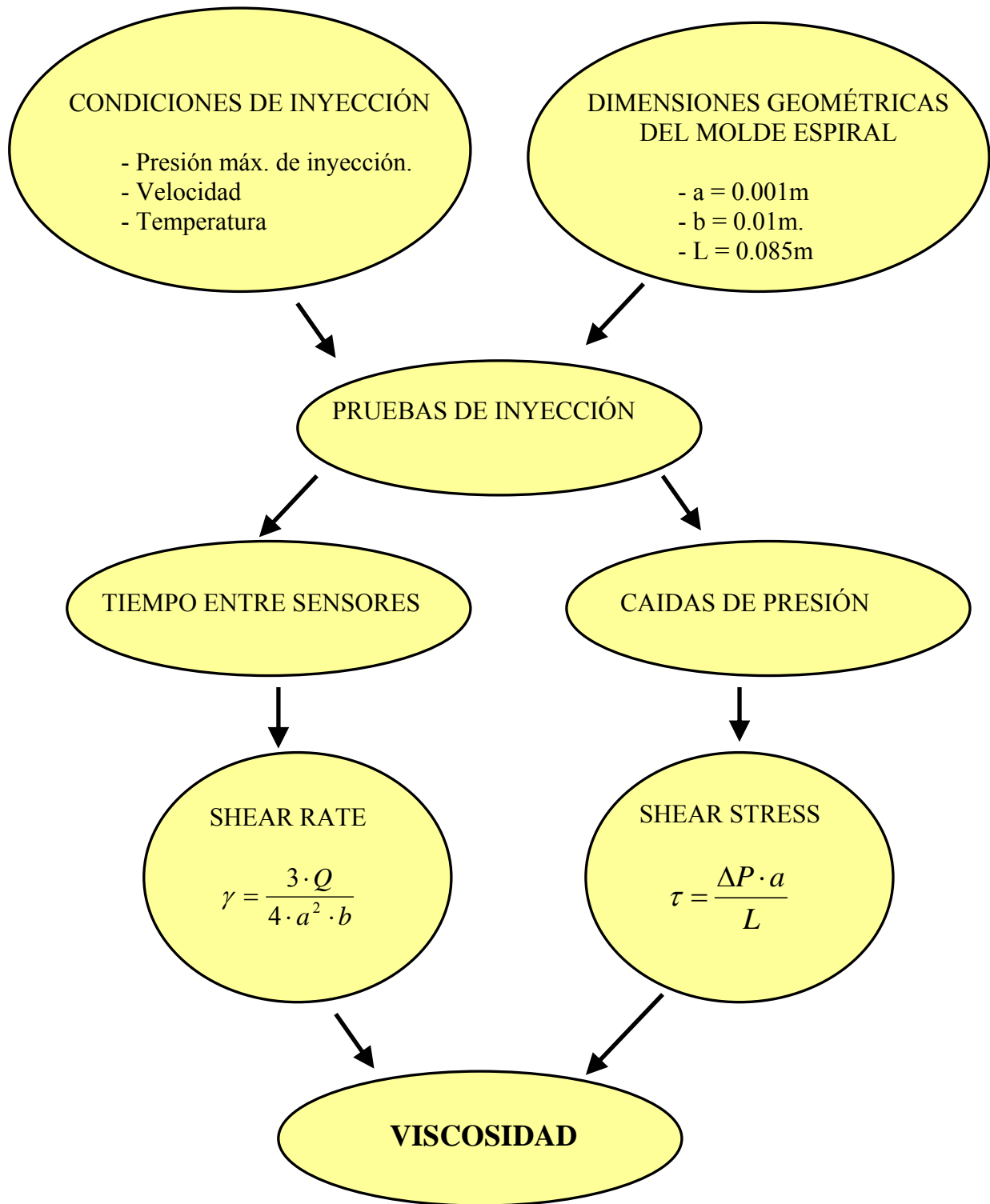
Primero se extraen las caídas de presión que se han producido en cada uno de los ensayos de inyección y el tiempo transcurrido desde que el material alcanza el primer sensor hasta que llega al segundo.

Con el tiempo obtenido de las pruebas de inyección y el volumen de plástico que hay entre los dos sensores que es un valor conocido, se calcula el caudal de inyección. A partir del caudal y los valores geométricos de la sección de la espiral se calcula el Shear rate.

Con los valores de caída de presión y valores geométricos de la sección de paso del molde, se obtiene el Shear stress.

El valor de la viscosidad se obtiene de la división del shear stress por el shear rate, tal y como se especificaba en apartados anteriores.

En el diagrama que a continuación se presenta se determina el orden de operaciones a realizar para calcular cada valor de viscosidad aparente a partir de las pruebas de inyección realizadas.

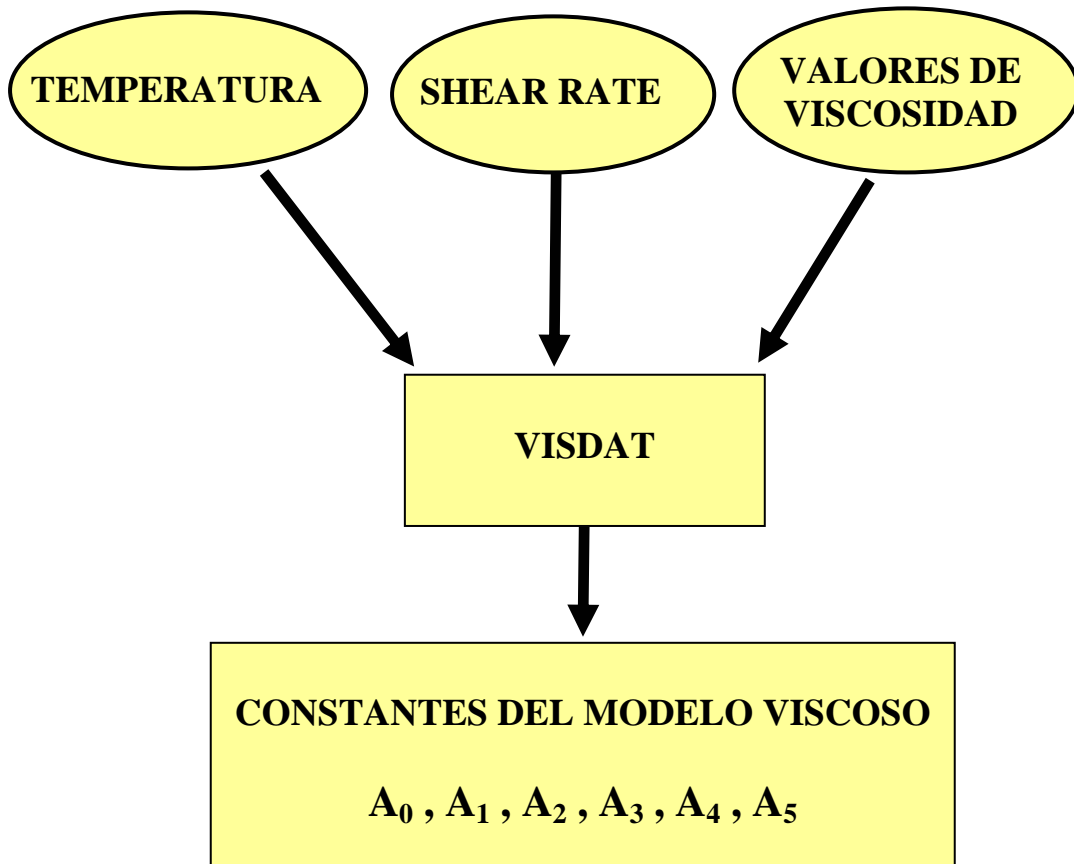


APLICACIÓN DEL VISDAT

El VISDAT es un programa informático que a partir de triadas de valores; temperatura, shear rate y viscosidad, calcula los valores de las constantes del modelo de segundo orden que cumplen los valores introducidos. Es decir, a partir de los valores de viscosidad equivalente calculados, mediante este programa informático, obtenemos la ecuación del modelo viscoso equivalente de segundo orden que define al material que hemos analizado mediante la inyección del molde espiral.

Cuando el VISDAT calcula las constantes que definen el modelo viscoso equivalente, el programa presenta el valor de desviación estándar con el que se ha realizado la aproximación matemática para el cálculo de las constantes de la ecuación de segundo orden. Se determina que la aproximación matemática es válida siempre que el valor de desviación estándar sea un valor inferior a 0.01. Si el valor de desviación estándar es superior, el ensayo del material no se considera válido.

Con los valores de las constantes determinadas por el VISDAT, la curva de viscosidad equivalente de ese material está definida.



4.4.- APLICACIÓN INFORMÁTICA

Dentro del grupo de investigación TIIP se han venido desarrollando numerosos trabajos relacionados con la reología de materiales termoplásticos. Aprovechando el desarrollo de una nueva aplicación informática denominada “Laboratorio de Reología 1.0” se decidió incorporar un módulo de trabajo con el molde espiral que incorporara la metodología desarrollada en este trabajo.

Este módulo desarrollado consta de dos partes. La primera parte es de carácter formativo, simula el trabajo con el molde espiral de cara a la obtención de los registros de presión que se obtienen con la aplicación del método desarrollado en la caracterización de un material, y que realiza el cálculo del modelo viscoso a partir de estos valores. La segunda parte sirve para facilitar el proceso de caracterización reológico mediante el molde espiral, ya que a partir de las caídas de presión de las pruebas experimentales permite de forma muy sencilla el cálculo del modelo viscoso y de las constantes correspondientes al modelo logarítmico.

De forma general se puede decir que el programa informático desarrollado además de otras aplicaciones, permite la obtención de la ecuación matemática del modelo viscoso de un material analizado por medio de un reómetro capilar o mediante ensayos de inyección realizados con un molde espiral u otro tipo de molde similar preparado para análisis viscosos. Este programa permite no tener que recurrir al “VISDAT” y trabajar con una herramienta moderna, que trabaja en entorno de Windows, con una interfaz más agradable y sencilla de uso para el usuario.

La estructura del programa se divide en tres partes principales; en función del método utilizado para la medición de la viscosidad, con reómetro capilar o con molde espiral, y el método de caracterización de material. Se ha utilizado Visual Basic para la programación de esta aplicación, con el fin de facilitar su difusión en entorno Windows. El interfaz desarrollado por ventanas, menús y botones hace que su utilización sea cómoda y sencilla. Para la realización de gráficos se ha realizado la programación dentro del entorno Excel, ya que es bastante más potente y agradable visualmente que el Visual Basic.

La pantalla de presentación que aparece cuando se ejecuta el programa es la siguiente:



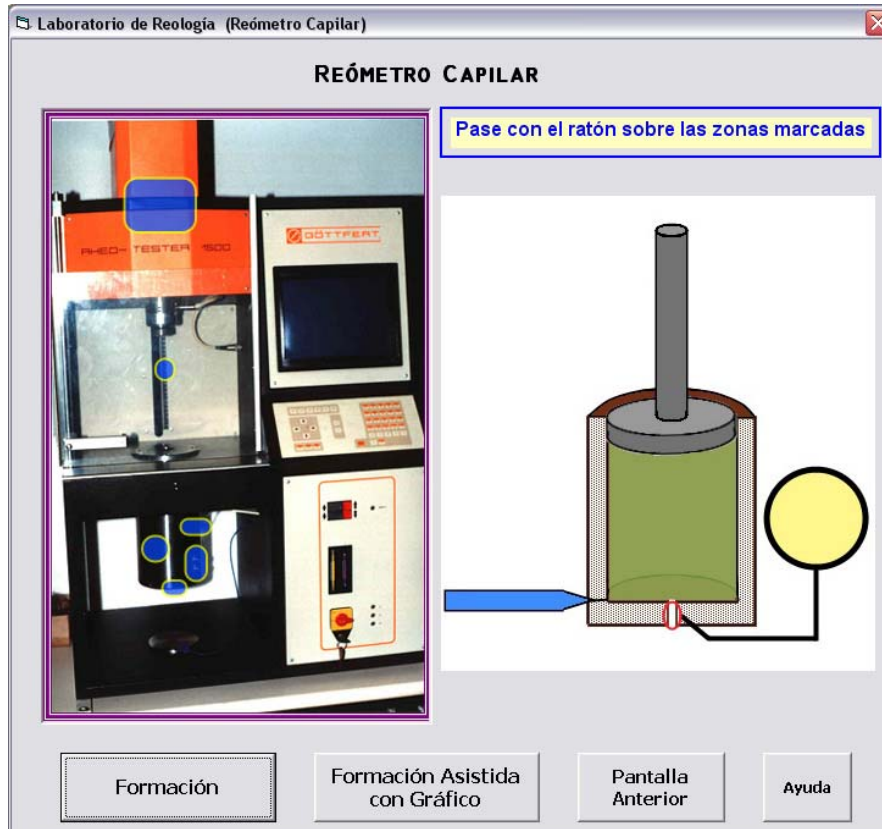
Pulsando una tecla o haciendo clic sobre la imagen se accede a la siguiente pantalla con el menú principal.



Aparecen en este menú las tres opciones de cálculo mencionadas anteriormente; “Molde Espiral”, “Reómetro Capilar” y “Caracterización del Material”. Cada opción nos dirige a distintos menús y aplicaciones.

REÓMETRO CAPILAR

Si se selecciona la opción de reómetro capilar, aparece en pantalla un nuevo menú con las siguientes opciones; “Formación”, “Formación Asistida con Gráfico”, “Pantalla Anterior” y “Ayuda”.



- **Formación:** Parte interactiva del programa. Introduciendo una serie de datos de partida al programa como material, temperatura, velocidad... se obtienen valores de presión con los que se pueden realizar cálculos manuales para la obtención de valores de viscosidad para cada una de las condiciones impuestas. Si se realizan diferentes ensayos con distintas condiciones se pueden obtener los resultados suficientes para representar gráficamente los valores de viscosidad frente a shear rate calculados para las distintas temperaturas ensayadas.

- **Formación asistida con gráfico:** Esta opción, como en el caso anterior, permite a partir de unos datos de partida que impone el usuario, obtener valores de presión con los que calcular la viscosidad y el shear rate para cada condición impuesta. Esta aplicación a demás nos permite dibujar la gráfica automáticamente, primero punto a punto y al final, la gráfica completa.

MOLDE ESPIRAL

La parte denominada “Molde espiral” es la diseñada y desarrollada a partir del trabajo realizado dentro de esta tesis doctoral. Busca dos objetivos principales; el primero tiene un marcado carácter formativo ya que se puede simular el proceso de caracterización reológico diseñado de forma virtual y el segundo es realizar el proceso de tratamiento de datos obtenidos en las pruebas experimentales realizadas de forma real con el molde espiral para obtener las constantes del modelo logarítmico.

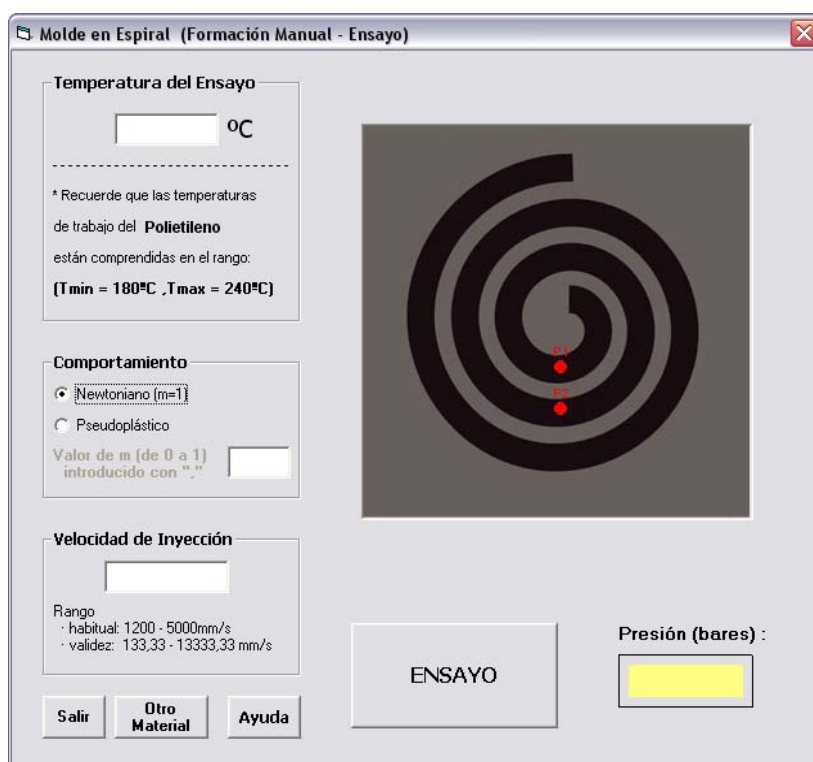
Si se selecciona la opción de “Molde espiral”, que accede a la siguiente pantalla;



La imagen muestra un molde espiral abierto, donde se puede ver la forma de la espiral por la que discurre el polímero durante su inyección, y los puntos donde se sitúan los sensores de presión. Al igual que en la opción de “Reómetro”, aparecen las dos opciones de trabajo; “Formación” y “Formación Asistida con Gráfico”.

- **Formación:**

La ventana que aparece tras la selección de esta opción es la siguiente:



El aspecto visual, y las variables a introducir son similares a la opción del reómetro capilar. Varía el cuadro de velocidades. Se permite introducir la velocidad que desee el usuario siempre que se encuentre dentro del rango que se indica en la parte inferior del recuadro.

La animación del ensayo muestra como el material plástico que se inyecta va llenando el molde. Los puntos indicados en rojo son los puntos donde se sitúan los sensores de presión y se toman las medidas de presión. La diferencia entre los valores de presión registrados son los que aparecen en el cuadro amarillo inferior.

- **Formación Asistida con Gráfico:**

El funcionamiento de esta opción es similar a la opción utilizada en el caso del reómetro, permite representar de forma simultánea los valores de presión calculados en cada uno de los ensayos realizados.

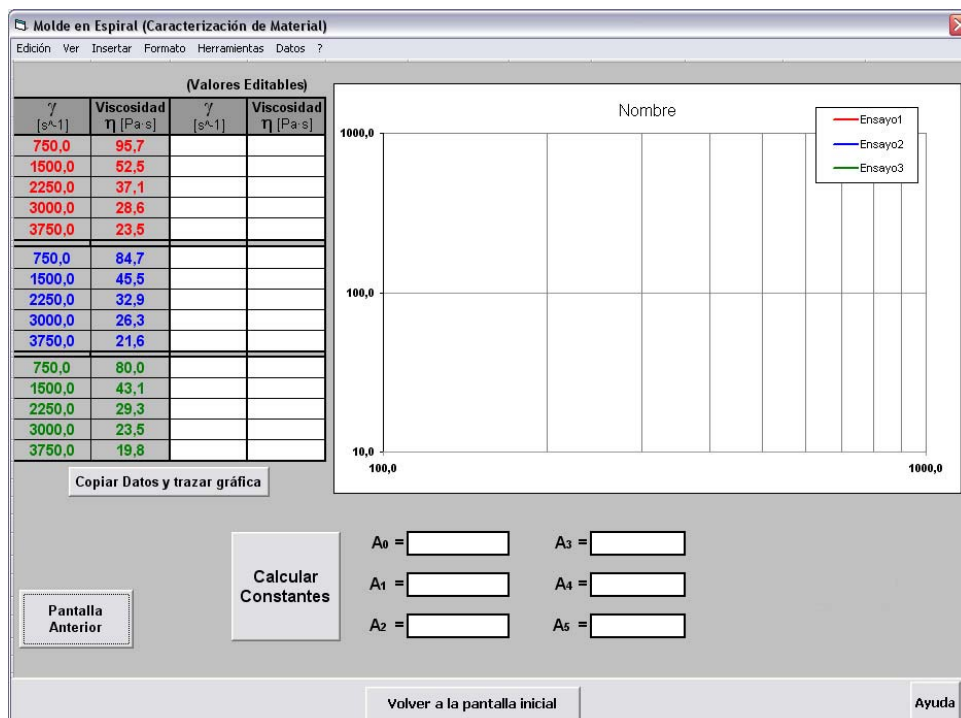
CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Si la opción elegida por el usuario es la de “Caracterización del material”, la aplicación ofrece las siguientes opciones; “Calcular”, “Guardar Datos de Presiones” y “Recuperar Datos de Presiones”, que permiten al usuario realizar las siguientes actividades;

- **Calcular:** Calcula los valores de velocidad de cizalla, tensión de cizalla y viscosidad a partir de los datos de temperatura, velocidad de inyección y presiones.
- **Guardar datos de presiones:** Permite guardar en un archivo de texto los datos introducidos manualmente en los cuadros destinados a presiones.
- **Recuperar datos de presiones:** Permite leer un archivo de texto guardado anteriormente con datos de presiones

4.- Metodología de caracterización reológica desarrollada.

Los cuadros de texto que en la imagen anterior aparecen en blanco se deben rellenar, bien manualmente, bien recuperando un archivo de datos. Una vez realizados los cálculos con los datos introducidos en la pantalla, se debe presionar el botón de “Continuar con la Caracterización”, con el que accedemos a la siguiente pantalla.



En las dos primeras columnas aparecen los datos obtenidos en la pantalla anterior (no modificables). Pulsando el botón situado justo debajo, se copian los datos a las columnas de la derecha y se traza la gráfica correspondiente a esos datos. Las columnas en las que se han copiado los datos son editables, es decir, permite modificar un dato que se considere erróneo tras la representación gráfica, con el fin de homogeneizar la tendencia y evitar errores en el cálculo posterior de las constantes. Se presiona el botón de “Calcular Constantes”, y en los recuadros de la derecha aparecen los valores de las constantes que definen el modelo viscoso de segundo orden del material ensayado.

Ecuación de un modelo viscoso de 2º orden:

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\gamma) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \ln(\gamma)^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\gamma) + A_5 \cdot T^2$$

Donde:

- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

Ejemplo de aplicación

Dentro del módulo de caracterización del material se puede trabajar de dos maneras distintas, la primera es introducir los datos de los sensores de presión, velocidades lineales y temperaturas a partir de un archivo (trabajaríamos partiendo de la ventana de la Fig. 1 de la siguiente página) y la segunda es introducir los datos de velocidades de cizalla y de viscosidad directamente (a mano o desde un archivo) a partir de la ventana de la Fig. 2 de la siguiente página.

4.- Metodología de caracterización reológica desarrollada.

Molde en Espiral (Caracterización de Material)

Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos ?

Temperatura 1 Velocidad lineal(mm/s) Presión 1 Presión 2 γ τ Viscosidad

ENSAYO 1

Calcular

Guardar Datos de Presiones

Recuperar Datos de Presiones

Temperatura 2 Velocidad lineal(mm/s) γ τ Viscosidad

ENSAYO 2

Temperatura 3 Velocidad lineal(mm/s) γ τ Viscosidad

ENSAYO 3

Nombre del Material

Nombre

Comentarios Velocidades por Defecto

Continuar con la Caracterización

Volver a la pantalla inicial Ayuda

Fig.1

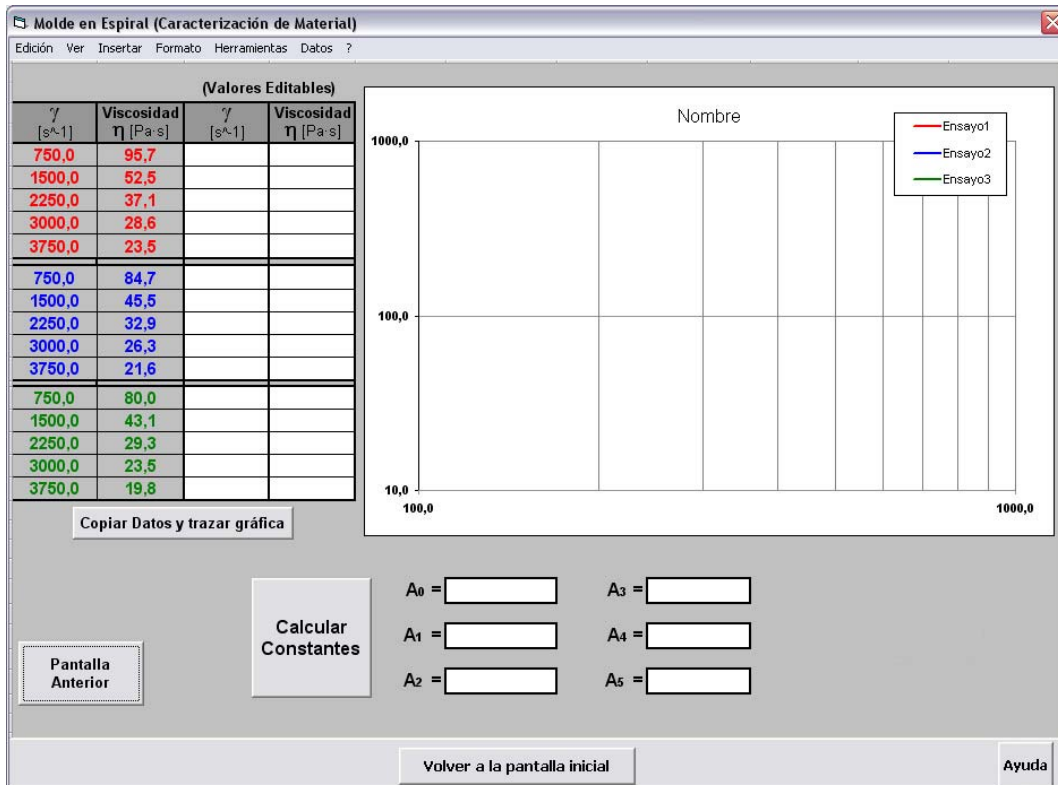


Fig.2

Para facilitar todo el proceso de cálculo que se realiza en la aplicación del método de caracterización desarrollado, se utilizaría la primera opción, y se partiría de los valores de presión registrados durante los ensayos en el molde espiral. Se tendrían que haber realizado pruebas a tres temperaturas diferentes, y para cada temperatura tendríamos que haber realizado pruebas a cinco velocidades distintas. En total sería un mínimo de quince ensayos con su correspondiente registro de presión del que tendríamos que obtener P1 y P2. Estos datos junto con los de temperatura y velocidad se utilizarían para rellenas las casillas marcadas con el recuadro rojo de la pantalla siguiente.

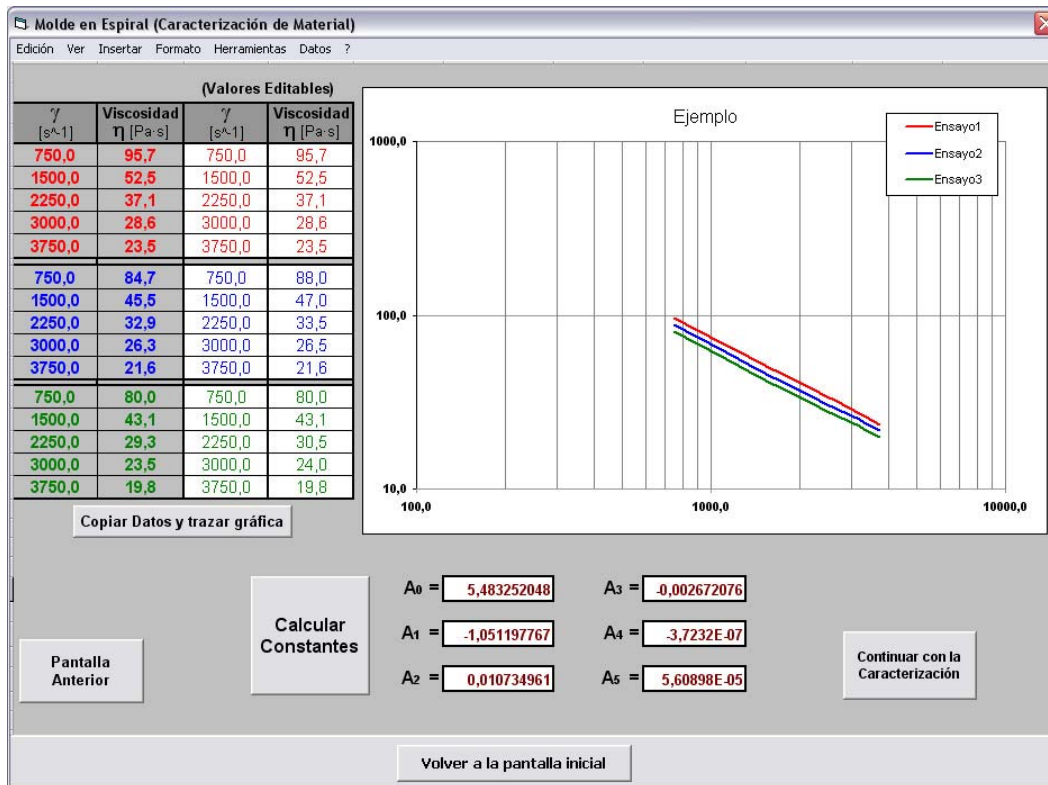
Temperatura	Velocidad lineal(mm/s)	Presión 1	Presión 2	γ	τ	Viscosidad
200 ENSAYO 1	1000	62	1	750	71764,70588	95,6862745098
	2000	68	1	1500	78823,52941	52,5490196078
	3000	72	1	2250	83529,41176	37,1241830065
	4000	76	3	3000	85882,35294	28,6274509803
	5000	76	1	3750	88235,29411	23,5294117647
220 ENSAYO 2	1000	55	1	750	63529,41176	84,7058823529
	2000	59	1	1500	68235,29411	45,4901960784
	3000	64	1	2250	74117,64705	32,9411764705
	4000	68	1	3000	78823,52941	26,2745098039
	5000	71	2	3750	81176,47058	21,6470588235
240 ENSAYO 3	1000	52	1	750	60000	80
	2000	56	1	1500	64705,88235	43,1372549019
	3000	58	2	2250	65882,35294	29,2810457516
	4000	62	2	3000	70588,23529	23,5294117647
	5000	65	2	3750	74117,64705	19,7647058823

Fig.3

Al pulsar el botón (calcular) el programa realiza los cálculos pertinentes y nos devuelve los datos en las tres columnas de la derecha con el shear rate, el shear stress y la viscosidad para cada ensayo.

4.- Metodología de caracterización reológica desarrollada.

Si pulsamos *Continuar con la Caracterización*, pasamos a la Fig. 3, donde se puede trazar la gráfica correspondiente a las viscosidades calculadas. Dentro de esta pantalla tenemos la opción de calcular constantes, que al ser accionado permite obtener las seis constantes en los recuadros inferiores.



4.5.- APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN A UN POLIPROPILENO

En este apartado, a modo de ejemplo, se va a proceder a la aplicación a un polipropileno, PP Stamyln PHC 31, el método de caracterización desarrollado en apartados anteriores. El objetivo es obtener las constantes que definen el modelo viscoso equivalente de este material para poder introducir las en los programas informáticos de simulación de inyección.

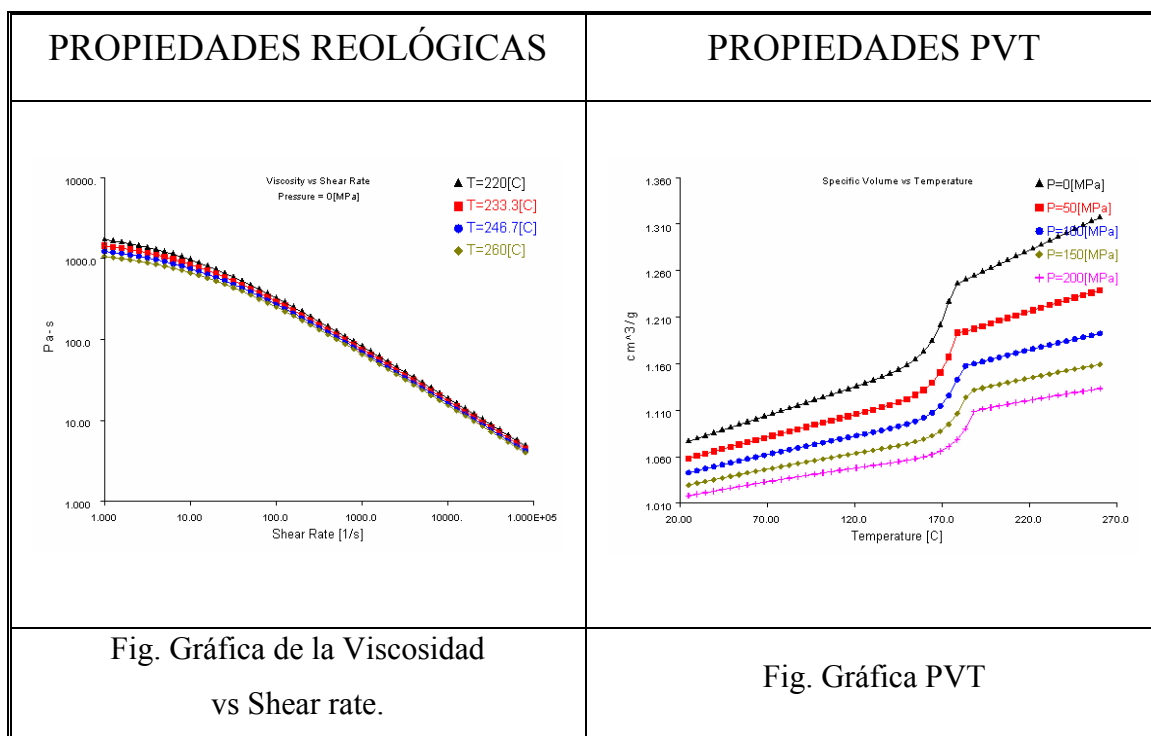
El material es suministrado como un granulado blanco, de esferas de 4mm de diámetro y no necesita ser secado previamente a su utilización.

Las propiedades termoplásticas de este material ofrecidas por el fabricante son las siguientes:

CONDICIONES DE PROCESO RECOMENDADAS			
Temperatura del molde	Rango de T ^a recomendado	T ^a min.	20° C
		T ^a max.	60° C
	T ^a recomendada	40° C	
Temperatura del material	Rango de T ^a recomendado	T ^a min.	220° C
		T ^a max.	260° C
	T ^a recomendada	240° C	
	T ^a máxima	280° C	
Temperatura de expulsión	76° C		
Shear stress máximo.	0.25 MPa		
Shear rate máximo.	100000 1/s		

PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	Temperatura (T ^a)	Calor específico (C _p)
	C	J/kg·C
	240	2690
Conductividad térmica	Temperatura (T ^a)	Conductividad térmica (K)
	C	W/m·C
	240	0.18

PROPIEDADES MECÁNICAS		
Modulo elástico	1 ^a dirección	1340 MPa
	2 ^a dirección	1340 MPa
	Poissons ratio (ν ₁₂)	0.392
	Poissons ratio (ν ₂₃)	0.392
Coeficiente transversal isotrópico de expansión térmica	Alpha 1	9,05E-005 (1/C)
	Alpha 2	9,05E-005 (1/C)



Ante de realizar las pruebas de inyección, es necesario determinar las condiciones de proceso bajo las que se van a realizar los ensayos, que deben cumplir las premisas que se explican más detalladamente en el apartado 4.3.

La presión de corte o presión máxima de inyección debe permitir que el material sobrepase en el molde, los dos puntos donde se colocan los sensores de presión, en las condiciones de inyección más desfavorables. Esto se realiza experimentalmente con la máquina de inyección antes de realizar los ensayos.

Las temperaturas y velocidades a las que se realizan las pruebas de inyección deben ser validadas previamente mediante simulaciones de inyección con un material similar, para comprobar que los parámetros de proceso elegidos cumplen la condición de que el salto térmico entre los dos puntos de medida sea menor a 2° C.

Se realizan las pruebas de inyección con el PP Stamyln PHC 31 y con el molde espiral bajo las siguientes condiciones de proceso:

- Presión de corte: 50bar.
- Temperaturas de material: 220, 240 y 260° C
- Velocidades de inyección: 25,50,75 y 100%

A través de la cadena de medida y con los sensores de presión se recogen los registros de presión, y aplicando las ecuaciones correspondientes detalladas en apartados anteriores se obtienen los valores de viscosidad equivalente.

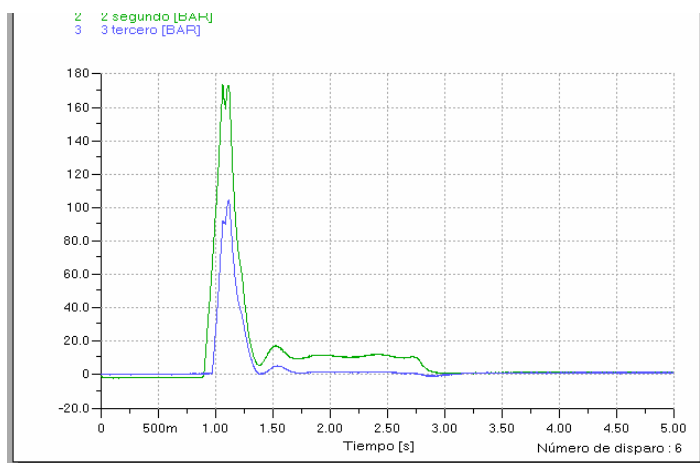
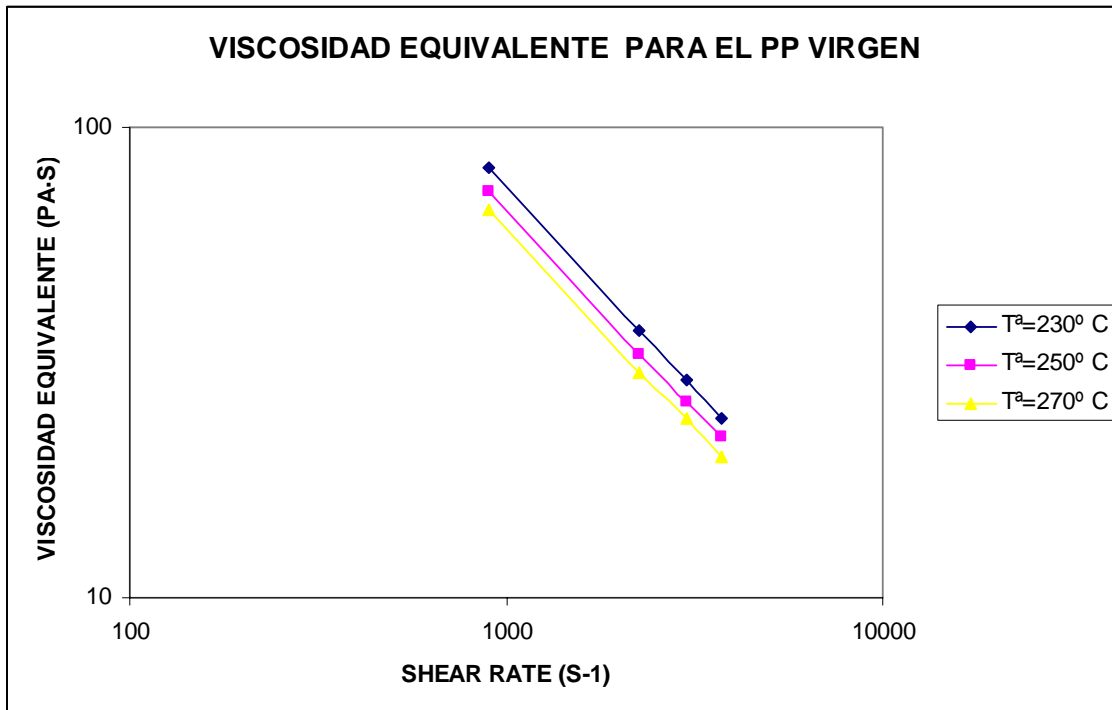


Fig. Gráfica de registro de presión obtenida en uno de los ensayos.

T ^a (°C)	% v	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
230	25	6282150	900	73908	82
	50	7143413	2250	84040	37
	75	7396725	3000	87020	29
	100	7548713	3750	88808	24
250	25	5572875	900	65563	73
	50	6383475	2250	75100	33
	75	6788775	3000	79868	26
	100	6991425	3750	82252	22
270	25	5167575	900	60795	67
	50	5876850	2250	69139	30
	75	6028838	3000	70928	24
	100	6332813	3750	74504	20

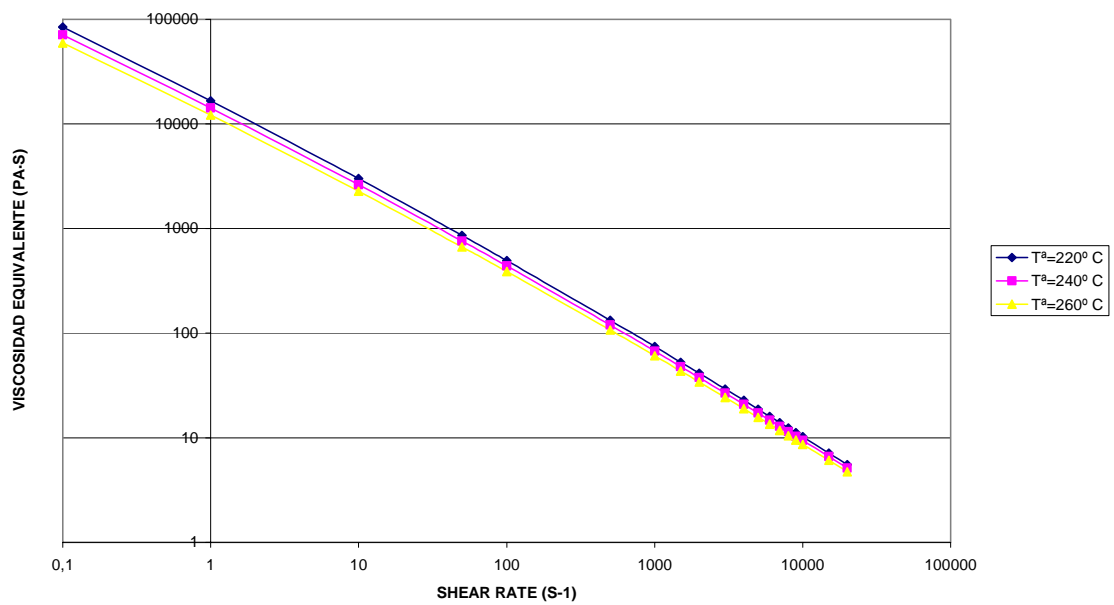
Representación de los valores de viscosidad equivalente calculados:



A continuación se introducen en el VISDAT los tríos de valores de temperatura, shear rate y viscosidad, y se obtienen las constantes del modelo viscoso de segundo orden.

A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
11,193	-0,814	-5,672E-03	-8,526E-03	4,064E-04	-4,627E-06

CURVA DE VISCOSIDAD EQUIVALENTE



4.6.- APLICACIÓN DEL MODELO VISCOSO

EQUIVALENTE CALCULADO A LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Uno de los objetivos principales por el que se ha decidido desarrollar este método de caracterización de materiales, es para poder introducir el modelo viscoso equivalente obtenido mediante un método industrial en la base de datos de un programa de simulación de inyección de plásticos.

En apartados anteriores se ha descrito como a partir de los datos recogidos por los sensores de presión durante el proceso de inyección de un molde espiral puede obtenerse el modelo viscoso equivalente de segundo orden del material inyectado.

En este apartado se va a explicar como introducir las constantes del modelo viscoso equivalente calculado en la base de datos del programa de simulación, en este caso Moldflow. Una vez introducidas las constantes de la ecuación de segundo orden que define al material, se puede analizar la simulación de inyección de una pieza con este nuevo material.

Las bases de datos de los programas de simulación tienen a parte del modelo viscoso, otros parámetros que definen cada material que. Los programas de simulación necesitan conocer parámetros del material como densidad, conductividad térmica, calor específico, módulo elástico, curvas PVT...para poder ofrecer al usuario la mayor cantidad de resultados y lo mas fiables posibles.

El programa de simulación permite introducir todas las variables que caracterizan el material y así introducir en la base de datos un material.

En el método de trabajo desarrollado determinamos las curvas de viscosidad equivalente del material que se quiere analizar. La introducción del nuevo material analizado se realiza a partir de un material existente en la base de datos del programa de simulación al que se le modifican las constantes del modelo viscoso por las constantes del modelo viscoso equivalente calculadas.

Siempre que sea posible se va a partir de un material que esté disponible en la base de datos y que sea lo mas similar posible al nuevo material caracterizado.

En el caso de analizar material reciclado, el material de partida va a ser el mismo material virgen disponible en la base de datos.

Para mostrar mas claramente como se realiza la introducción de un material caracterizado por el método desarrollado, vamos a ilustrarlo mediante un ejemplo.

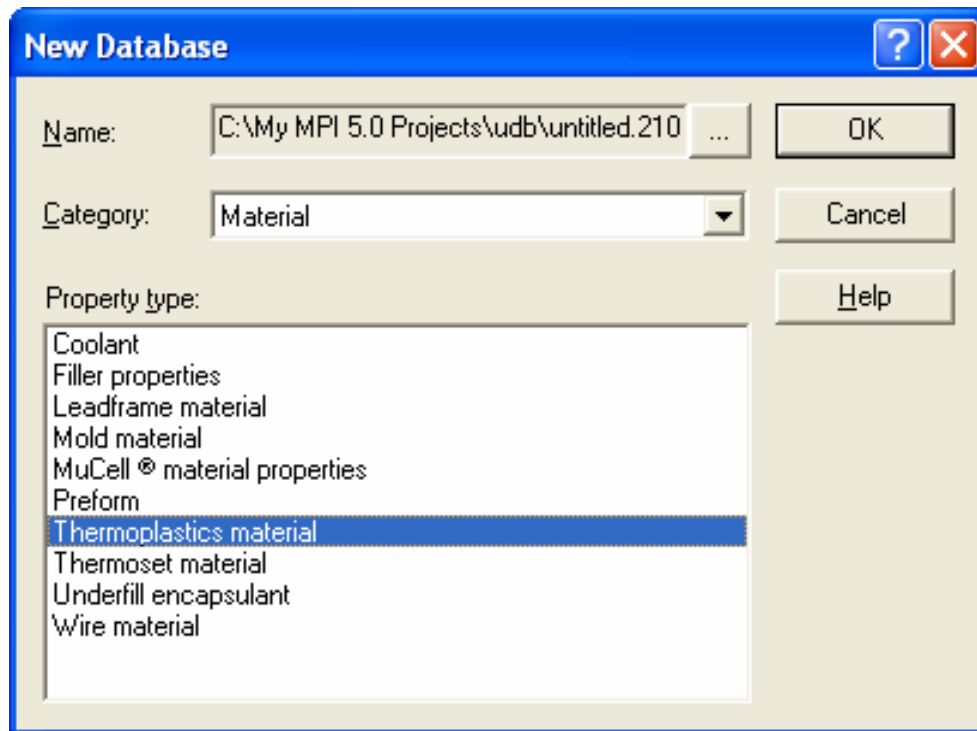
El material elegido es el mismo sobre el que se ha aplicado el método de caracterización desarrollado en el apartado anterior, 4.5., un polipropileno, “PP Stamyln PHC 31”, por lo que ya disponemos de las constantes del modelo viscoso equivalente de segundo orden.

Las constantes obtenidas en el apartado anterior son las siguientes:

A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
11,193	-0,814	-5,672E-03	-8,526E-03	4,064E-04	-4,627E-06

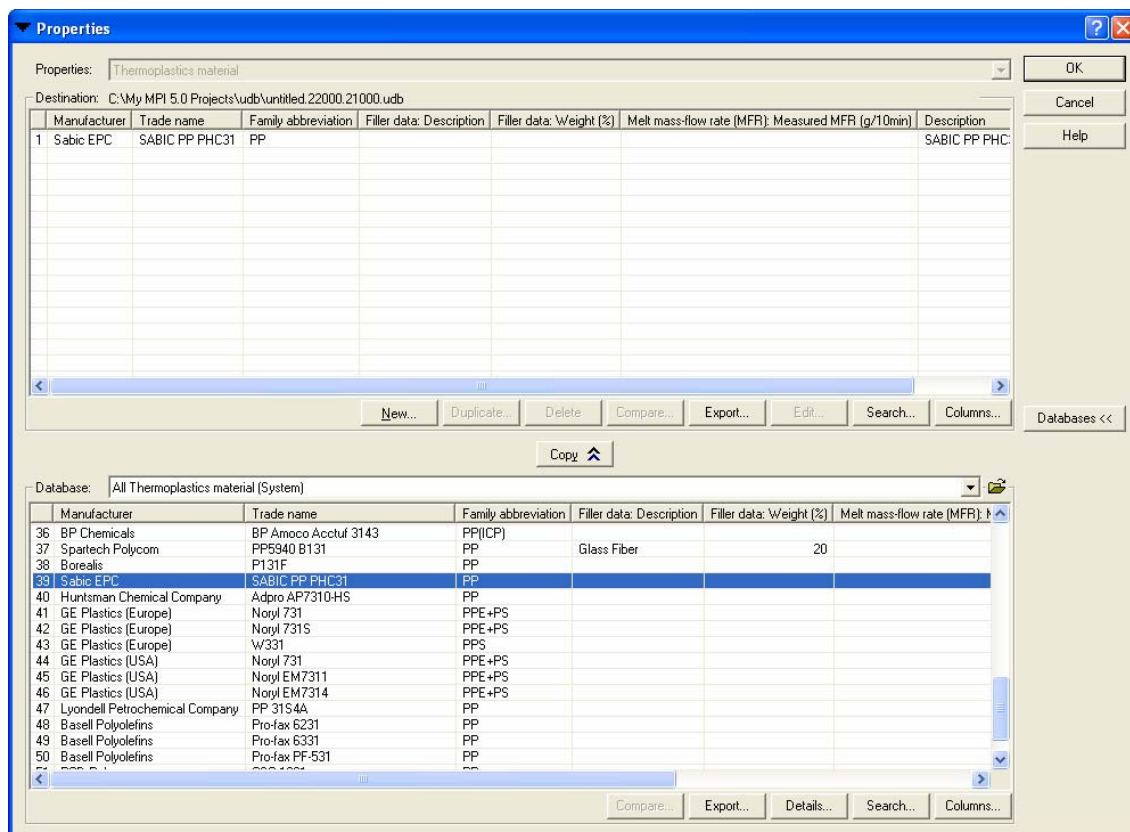
Para poder simular la inyección de una geometría con el material que ha sido analizado por el método de análisis desarrollado, se deben introducir las constantes calculadas que definen el material en la base de datos del programa de simulación.

Para introducir un material nuevo lo primero que se debe hacer es crear una base de datos de material termoplástico personal. El programa guarda la nueva base de datos en sus carpetas de programa con extensión “udb”.



Como se observa en la siguiente ventana que presenta el programa para la introducción de un nuevo material, podemos elegir varias opciones;

- **New**; El programa ofrece su ficha de material vacía para que el usuario introduzca todos los parámetros que caracterizan el nuevo material de la base de datos.
- **Export**; El programa permite importar la base de datos guardada en un archivo “txt”-
- **Databases**: Permite acceder a la base de datos de materiales del programa para copiar la ficha de caracterización del material que decida el usuario.

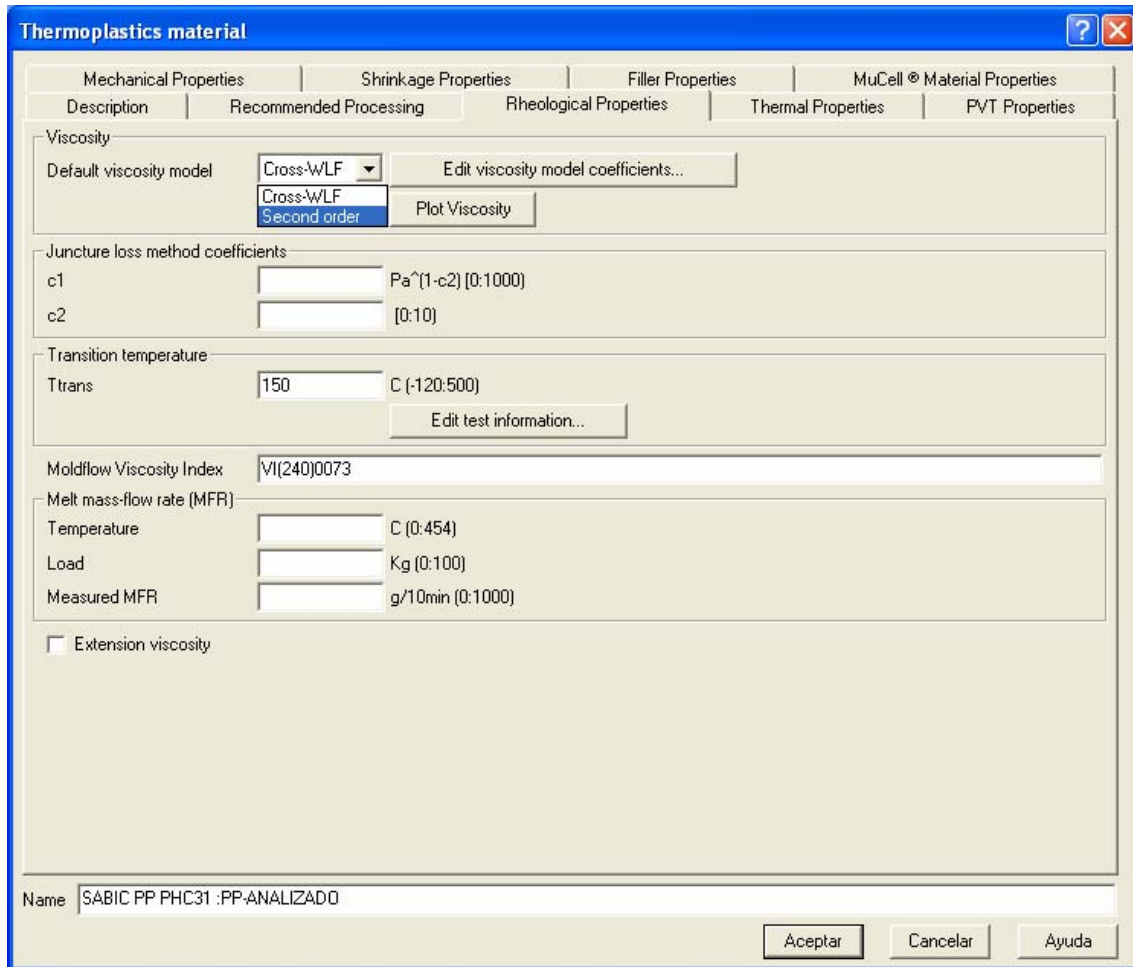


En el desarrollo de este método de caracterización determinamos el modelo viscoso equivalente del material, por lo que utilizamos la opción de copiar la ficha de características del material más similar al material caracterizado. En este caso copiamos el propio material que hemos analizado ya que se encuentra disponible en la base de datos del programa de simulación.

La ficha de material copiada pasa a la nueva base de datos creada, desde donde puede ser editada.

Al editar la ficha de características del material copiada, el programa permite modificar todos los valores de la misma.

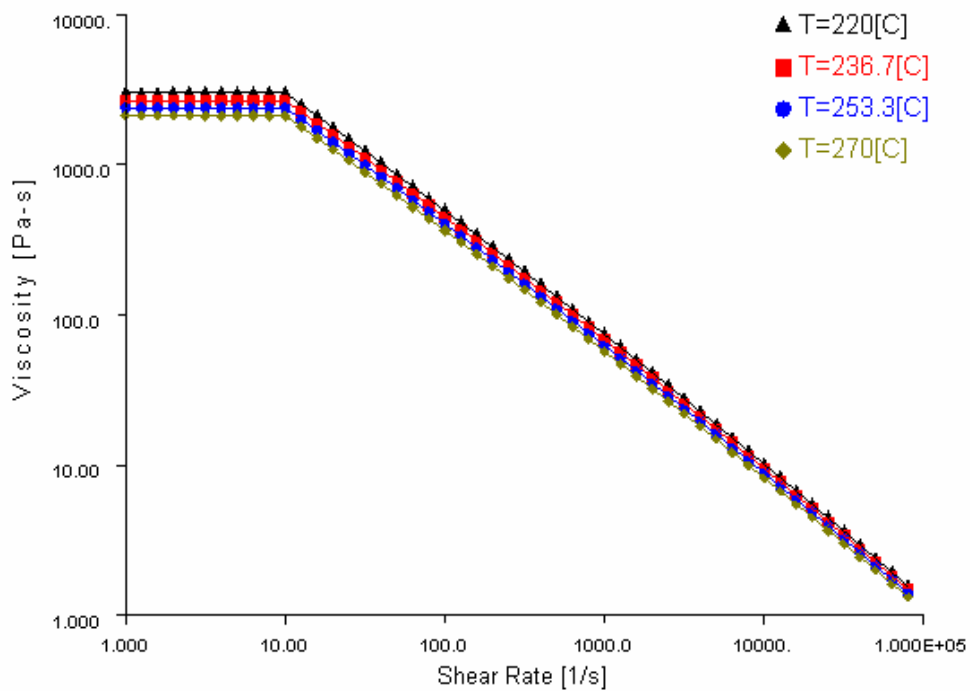
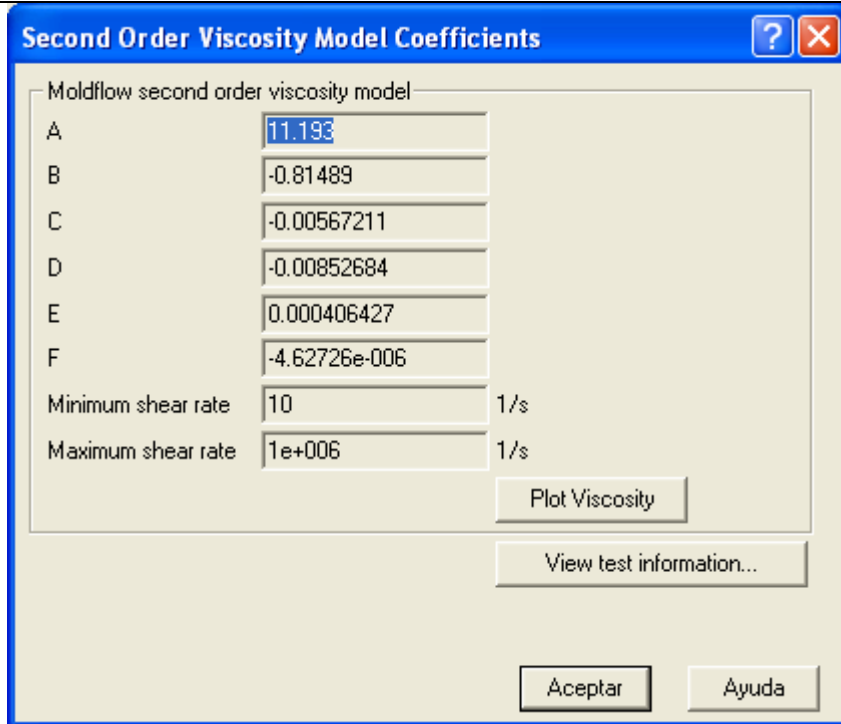
En nuestro caso solo vamos a modificar el nombre del material para identificarlo y las constantes de la curva de viscosidad que es el parámetro que ha sido calculado con el método desarrollado.



Para introducir el modelo viscoso, como hemos explicado en apartados anteriores, el programa permite elegir la ecuación de modelo viscoso entre Cross-WLF y segundo orden. Elegimos la ecuación de segundo orden ya que son las constantes que han sido determinadas por el VISDAT.

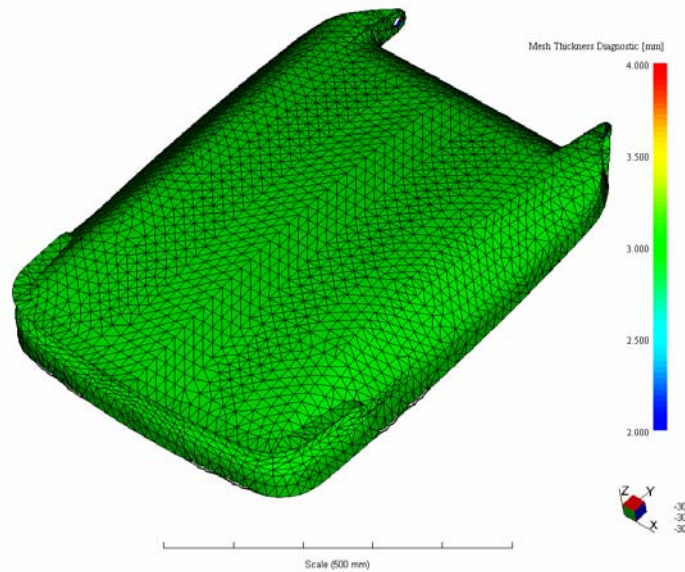
Pulsando el botón de “Edit viscosity model coefficients” aparece la siguiente ventana, en la que se introducen los valores de las constates obtenidas con el método desarrollado.

MODELO VISCOSO EQUIVALENTE OBTENIDO



Con el material introducido en la base de datos del programa de simulación, podemos simular cualquier geometría.

A continuación se recogen los resultados obtenidos de la simulación de una geometría con el modelo viscoso equivalente obtenido por el método desarrollado



Geometría utilizada para la simulación. Distribución de espesores.

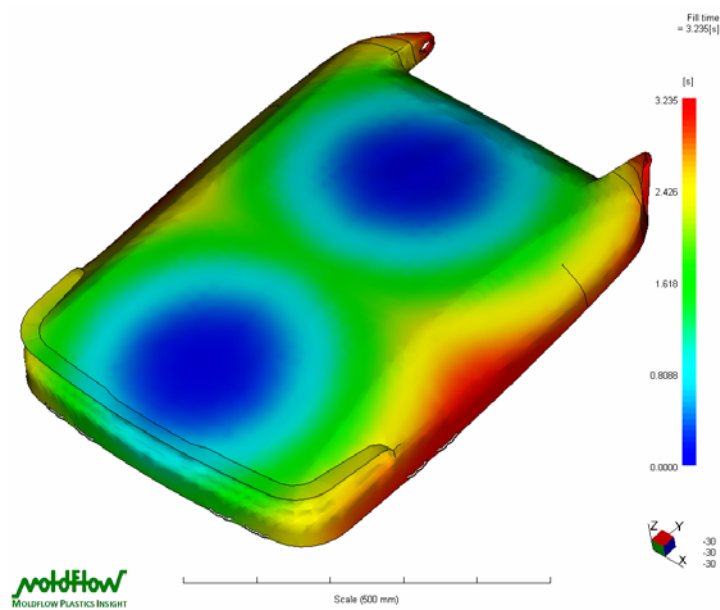


Fig. Llenado de la pieza.

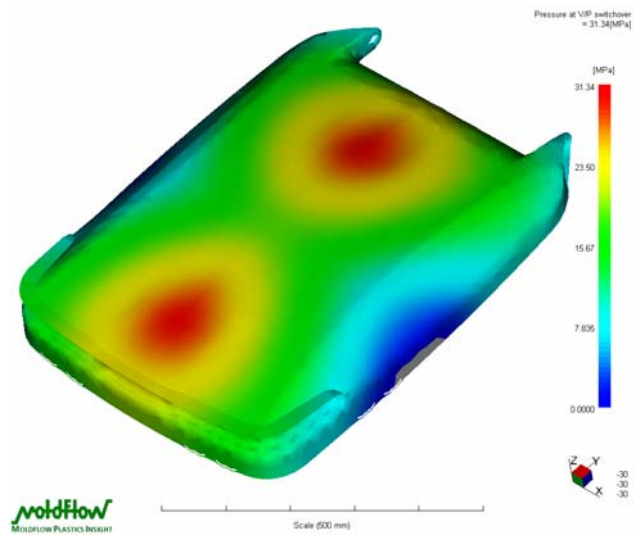


Fig. Presión en pieza al final del llenado.

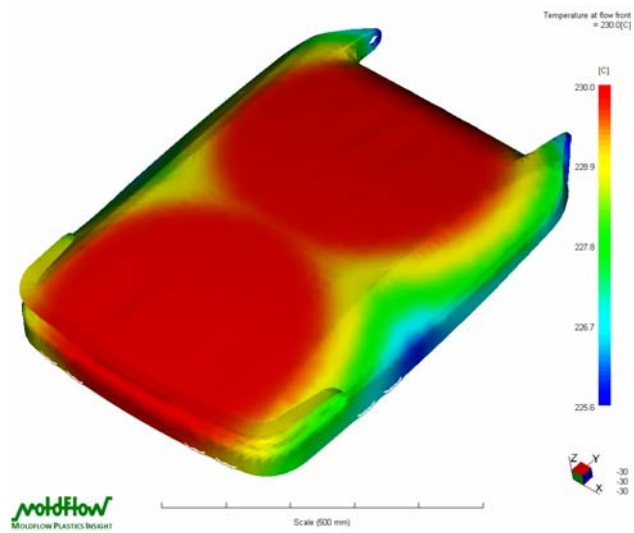


Fig. Temperatura del frente de avance.

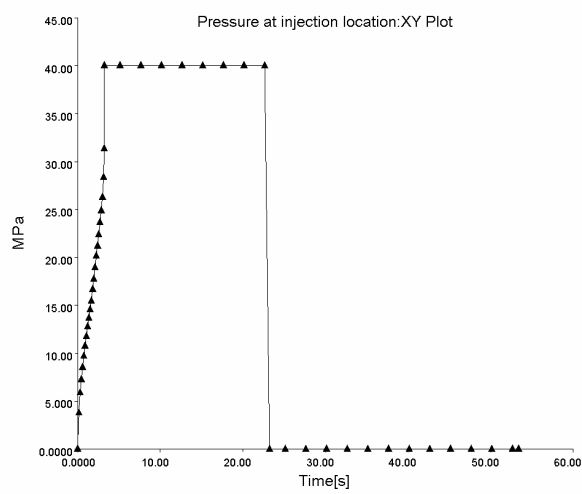


Fig. Evolución de la presión de inyección.

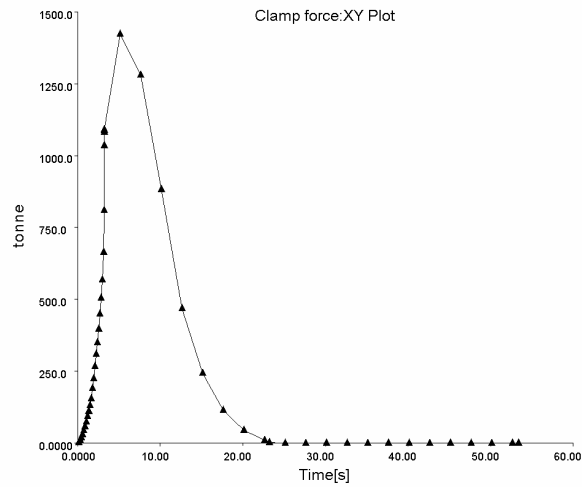


Fig. Fuerza de cierre.

Con este procedimiento podemos introducir en la base de datos personal que ha sido creada en el programa de simulación todos los materiales que sean analizados y así crear una base de datos de materiales que puede ser utilizada en cualquier momento para la simulación de inyección de una pieza.

5.- CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE RECICLADO EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y MECÁNICAS DE UN PEHD. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA

En este capítulo se va intentar caracterizar desde el punto de vista reológico y mecánico un polietileno de alta densidad utilizado por la empresa CONTENUR en la fabricación de grandes contenedores.

Desde hace más de ocho años el TIIP colabora con dicha empresa en el desarrollo de productos fabricados en este material. Durante la producción se generan, sobre todo en la puesta a punto de los moldes, grandes cantidades de piezas defectuosas que son recicladas mediante el molido mecánico y cuyo material es incorporado en el proceso de inyección junto a material virgen.

Se ha observado de forma experimental que la adición de material reciclado influye en el proceso de inyección, debiendo adaptar los parámetros de máquina en función de la adición o no de material reciclado e influyendo en las propiedades mecánicas del producto obtenido. Al no estar cuantificada esta influencia obliga a trabajar con porcentajes muy bajos de material reciclado para no correr ningún riesgo de reducción de la calidad del producto.

El objeto de este apartado es la cuantificación de la influencia de la introducción de material reciclado en función de su porcentaje tanto en las propiedades reológicas como en las propiedades mecánicas. Para conseguir esto se va a proceder a aplicar el método de caracterización reológica explicado en el capítulo anterior. Se va a trabajar tanto con el material virgen como con distintos porcentajes de reciclado. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método se intentarán contrastar posteriormente de forma experimental mediante pruebas de inyección con moldes reales.

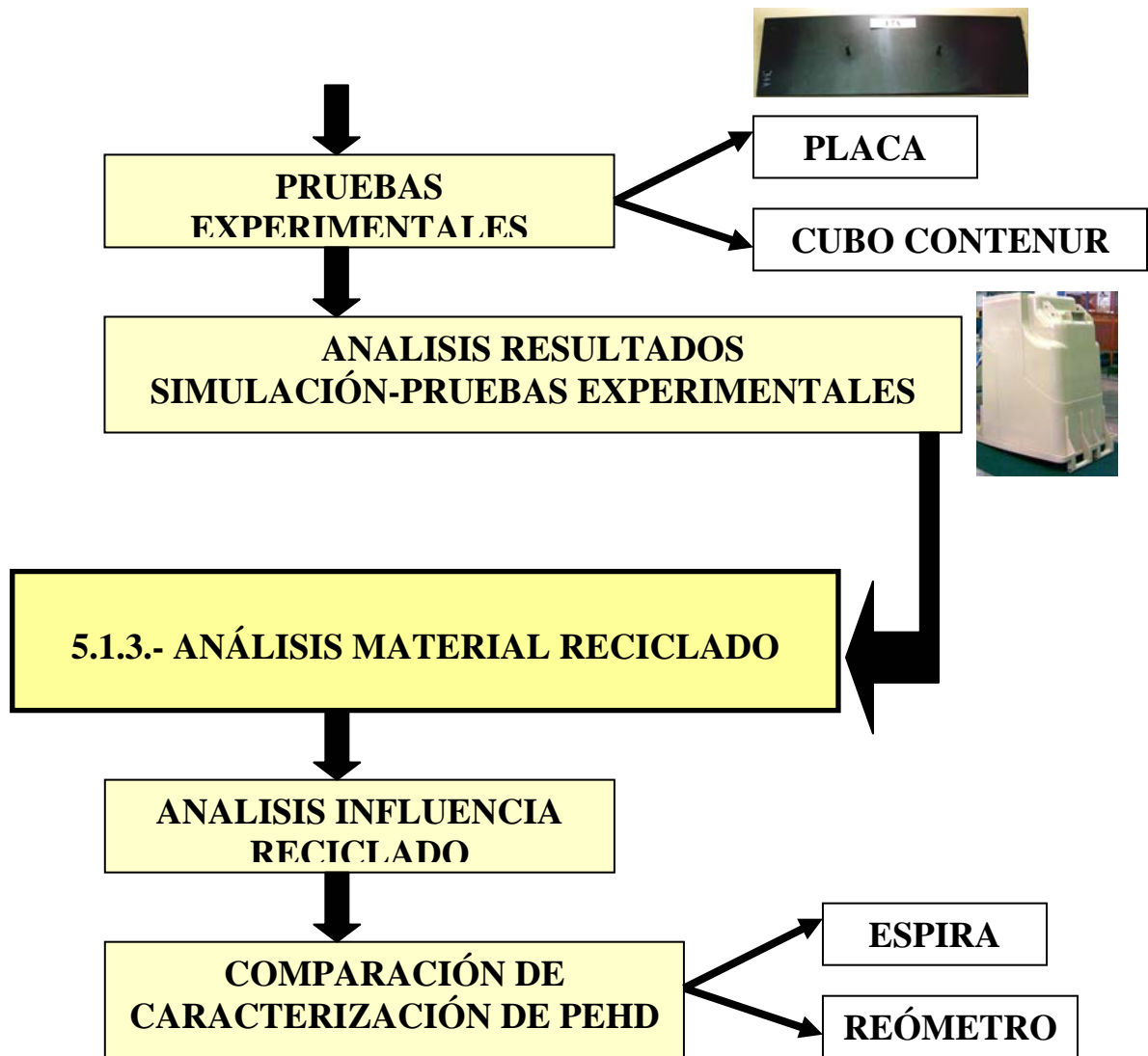
Además va a ser una forma experimental de comprobación de resultados ya que previamente se ha realizado un trabajo con un material similar y distintos porcentajes de reciclado pero caracterizando el material a través de un reómetro capilar. Este trabajo se explica en el apartado de trabajos previos

5.1.- CARACTERIZACIÓN REOLOGICA DEL MATERIAL RECICLADO

En este primer apartado del capítulo 5, se va a proceder a la caracterización reológica de un PEHD mezclado con diferentes porcentajes de material reciclado.

La organización del apartado se presenta en el siguiente diagrama.





En este diagrama, el primer punto presenta un trabajo de caracterización reológica del material con diferentes porcentajes de material reciclado realizada mediante un reómetro capilar.

En el segundo apartado se realiza una caracterización análoga mediante el molde espiral. Con los modelos viscosos que se han obtenido con esta segunda caracterización se realizan simulaciones sobre tres moldes reales, el propio molde espiral, un molde experimental de grandes dimensiones denominado molde placa, y un molde de un contenedor de gran tamaño. Posteriormente se intentan reproducir los casos de simulación con los moldes reales.

Se inyectan el molde placa y el molde del contenedor utilizando material reciclado y registrando valores de presión. Por último se comparan los resultados de simulación con los obtenidos en la inyección real.

En el último punto se valora la influencia de la introducción de material reciclado en el comportamiento reológico del material analizando los resultados de la caracterización del material realizada por diferentes métodos.

5.1.1.- Trabajos previos.

Se ha realizado un trabajo previo al desarrollo de este método de caracterización, en los que se han analizado entre otras variables la influencia del porcentaje de reciclado en la viscosidad de un material.

Este trabajo previo caracterizan las propiedades reológicas de un polietileno de alta densidad mezclado con distintos porcentajes de reciclado y distintos aditivos, mediante un reómetro capilar.

A partir de los resultados obtenidos de la caracterización reológica de las distintas mezclas de materiales, se realiza una simulación de inyección del llenado de una pieza, para comprobar que los resultados obtenidos son coherentes.

El trabajo está dividido en tres partes. Primero la caracterización reológica de los materiales mediante un reómetro capilar. Después la obtención de las constantes que definen el modelo viscoso de segundo orden de cada uno de los materiales. Y por último, la simulación de inyección de una pieza utilizando los modelos viscosos obtenidos, para comparar los resultados obtenidos.

Como se han analizado distintos porcentajes de reciclado, este trabajo nos va a permitir realizar posteriormente una comparación con los resultados que se obtengan de la aplicación de nuestro método de caracterización.

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

Para caracterizar el comportamiento viscoso del polietileno, se recurre a un modelo viscoso, que de forma analítica permite describir las curvas reológicas. Como se quieren introducir los modelos viscosos calculados en un programa de simulación, se recurre a la ecuación de segundo orden por se aquella sobre la que el programa permite introducir nuevas constantes. La ecuación de modelo viscoso de segundo orden junto con es modelo viscoso de Cross-Wolff, son los dos tipos de modelos viscosos que utilizan los programas de simulación.

La ecuación de un modelo viscoso de 2º orden es:

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\gamma) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \ln(\gamma)^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\gamma) + A_5 \cdot T^2$$

Siendo:

- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

Para analizar cada una de las diferentes mezclas de material virgen con distintos porcentajes de material reciclado se utiliza un reómetro capilar GOTTFERT 1500.

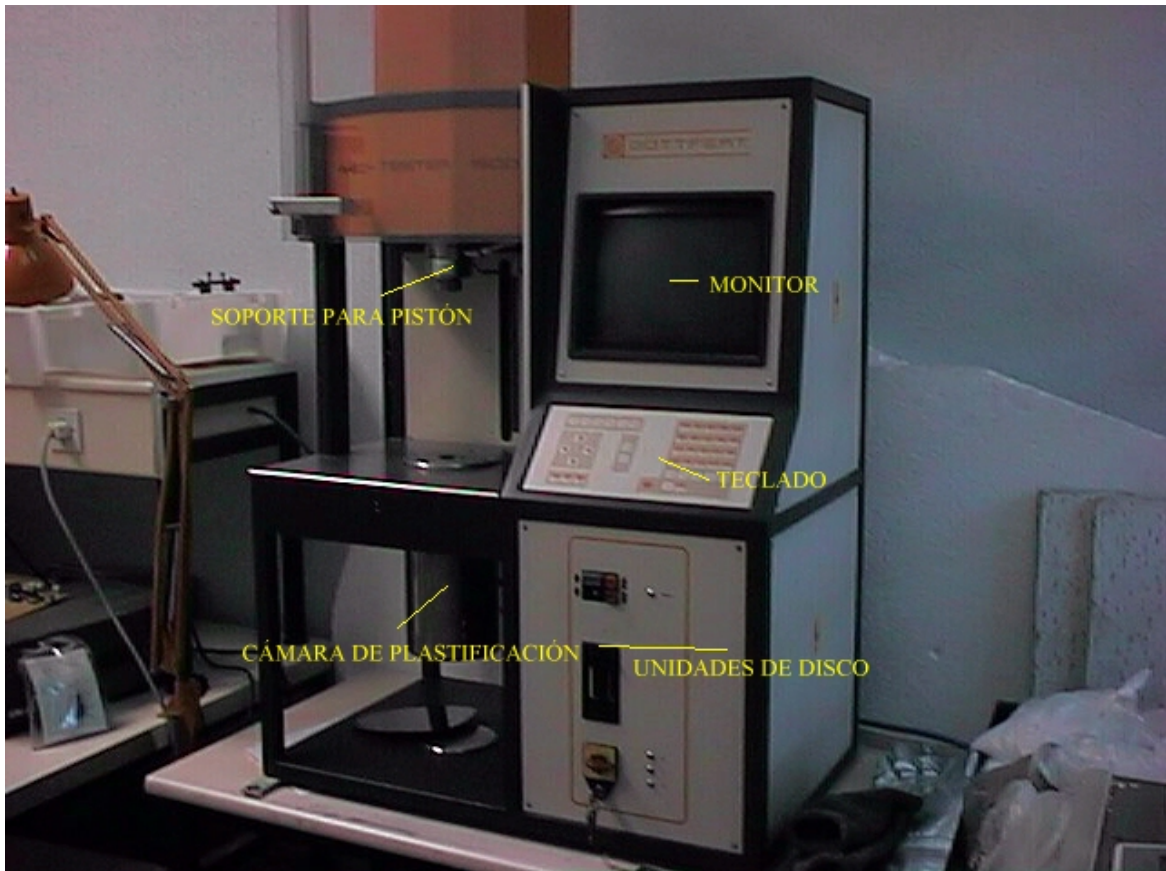


Fig. Imagen del reómetro utilizado en los ensayos.

La secuencia de realización de un ensayo de reometría consta de las siguientes partes:

1. Secado del material: El polietileno no es un material que se caracterice por absorber humedad del ambiente, pero se introduce en la secadora para evitar que se pueda producir vapor de agua en el interior del reómetro durante el ensayo y falsee los resultados que se obtengan.
2. Encendido y montaje del reómetro. Hay ciertos componentes del reómetro como los capilares que deben ser montados cuando el conjunto ha alcanzado cierta temperatura, esto es debido a la dilatación que sufren los componentes metálicos que componen el reómetro. Así se intenta garantizar el ajuste entre el capilar y la cámara de plastificación.

3. Se elige el capilar a utilizar en función del material que vaya a ser ensayado y posteriormente, y cuando el conjunto está caliente se introducen en el interior del cilindro y se enrosca.

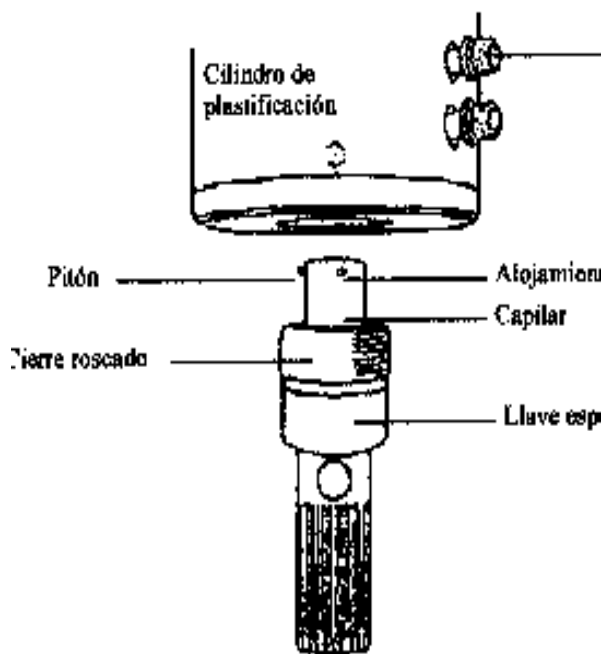


Fig. Esquema de componentes de montaje de un reómetro capilar.

4. Condiciones del ensayo. En los paneles de control del reómetro se introducen los parámetros del ensayo, temperatura de trabajo, capilar utilizado, velocidades...
5. Realización del ensayo. Cuando el sistema ha alcanzado la temperatura de trabajo deseada, ya se puede realizar en ensayo tal y como se explica mas detalladamente en el apartado 3.2.
6. Cuando el ensayo finaliza, el monitor del reómetro te ofrece los valores de viscosidad aparente y viscosidad (valores corregidos con las correcciones de Rabinobicy) frente a shear rate que ha obtenido en el ensayo.
Es necesario realizar un mismo ensayo un mínimo de tres veces para confirmar la validez de los resultados

El material utilizado para realizar los ensayos es un polietileno de alta densidad utilizado por la empresa CONTENUR para la fabricación de grandes contenedores, la denominación es RIGIDEX 5740 UA

El material analizado es de color gris y verde y a parte de analizar el material virgen se analiza el material mezclado en diferentes porcentajes de reciclado; 20%, 40%, 60%, 80% y 100%.



Fig. Material virgen.



Fig. Material reciclado.

En las imágenes anteriores se observa la regularidad en el tamaño del material virgen que suministra el fabricante y la irregularidad y gran tamaño del material reciclado que se obtiene del molino utilizado por CONTENUR.

Todos los ensayos se realizan con el mismo procedimiento y bajo las mismas condiciones:

- Temperaturas de ensayo: 210°C, 230° C y 250°C.

- La cantidad de material que se introduce en el reómetro para la realización de cada uno de los ensayos es de 19-20 g de peso de granza. El material se introduce muy poco a poco, presionando y compactando bien las partículas de material introducidas. El objetivo es minimizar los errores que puedan aparecer en los resultados de los ensayos debido a la no homogeneidad de la muestra analizada, causados por la diferencia de tamaño entre el material virgen y el material reciclado tanto en la distribución de los dos materiales, como en el grado de fundido como en la temperatura.

- El tiempo de retardo para el curado del material en el interior del cilindro a la temperatura de ensayo se aumenta de 2 hasta 10min, para intentar asegurar que todas las partículas de la muestra están completamente fundidas y a la misma temperatura.

El procedimiento bajo el que se realizan los ensayos para este material en el reómetro capilar es proceso largo y costoso, ya que cada material se analiza un mínimo de tres veces y a tres temperaturas diferentes. El tiempo necesario para analizar un material es muy elevado.

También hay que tener en cuenta que hay materiales que deben ser ensayados más de una vez si los resultados que se obtienen no son coherentes.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo reológico del PE-HD virgen.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO			
Shear rate γ (1/s)	η (210°C)	η (230°C)	η (250°C)
86.4	715	608	544
115.2	655	566	491
288	481	395	350
576	352	301	264
864	285	252	221
1150	245	217	195
1720	205	170	157
2300	175	144	133
3450	135	112	103

CALCULO DE CONSTANTES DEL MODELO VISCOSO

De los ensayos reológicos realizados se obtiene valores de viscosidad frente a valores de shear rate a tres temperaturas distintas para cada material.

Con estos datos se puede dibujar una gráfica logarítmica en la que se representa la viscosidad frente al shear rate para cada temperatura.

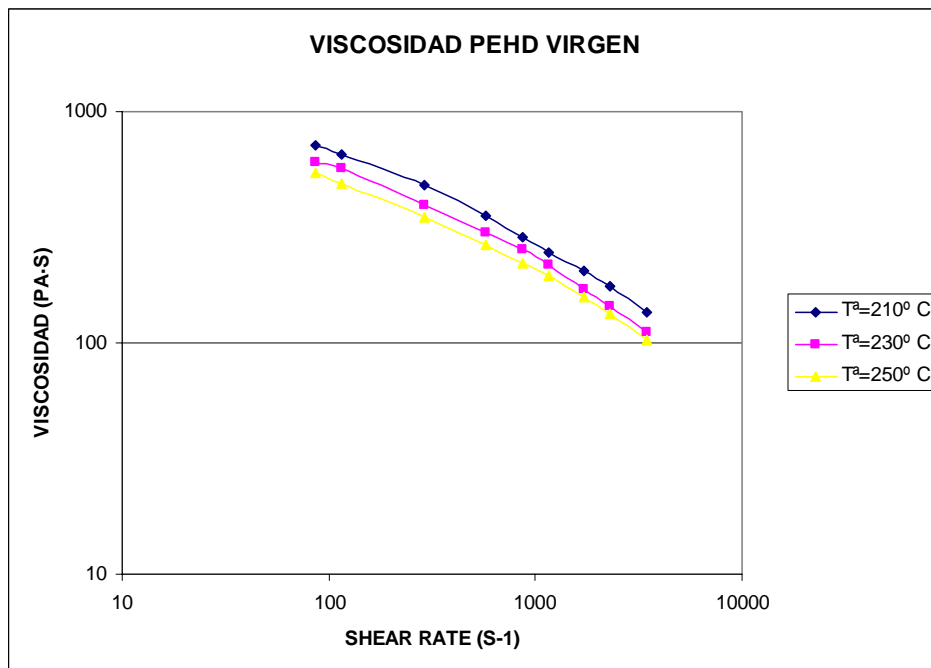


Fig. Resultados del ensayo del PE-HD virgen

Esta representación nos da una idea de si los resultados obtenidos de los ensayos son o no válidos para proceder al cálculo de las constantes del modelo viscoso. Si las curvas tienden a intersertarse, el ensayo no ha sido válido y tendrá que ser repetido.

En algunas ocasiones los valores de viscosidad deben ajustarse ligeramente para evitar errores de ajuste al calcular las constantes que definen el modelo viscoso de segundo orden.

Cuando ya se tienen listados de viscosidad y shear rate coherentes para cada temperatura y material se introducen en el programa informático VISDAT, que mediante extrapolación calcula las constantes que caracterizan el modelo viscoso de segundo orden de cada material.

En algunas ocasiones el VISDAT no llega a calcular la aproximación de segundo orden debido a errores que le aparecen al intentar realizar los cálculos. Esto puede producirse por dos causas principalmente;

- Un mal ajuste de las curvas de viscosidad.
- Un ensayo reológico insuficiente o no representativo para realizar el cálculo.

Si no hay ningún problema en el cálculo, el VISDAT nos proporciona las constantes viscosas del modelo de segundo orden, que para el caso del PE-HD virgen resultan ser:

A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
7,284	0,121	2,577E-03	-4,770E-02	1,281E-04	-2,214E-05

SIMULACIÓN

Una vez conocidos los modelos viscosos de segundo orden de todos los distintos porcentajes de reciclado analizados pueden ser introducidos en el programa de simulación y comparar los resultados que se obtienen con cada uno de ellos.

Para la realización de las simulaciones se va a contar con la geometría de uno de los productos fabricados por CONTENUR, el cuerpo de un contenedor de 1100L para recogida de residuos sólidos urbanos. Las características generales del conjunto al que pertenece el cuerpo que se va a simular, se detallan en el siguiente cuadro.

MODELO	<i>CONTENEDOR 1100 L</i>
Anchura	1370 mm
Fondo	1050 mm
Altura	1465 mm
Ruedas	4 ($\Phi = 200$ mm)
Peso	35 Kg.

A continuación se muestra un plano con las medidas generales del contenedor:

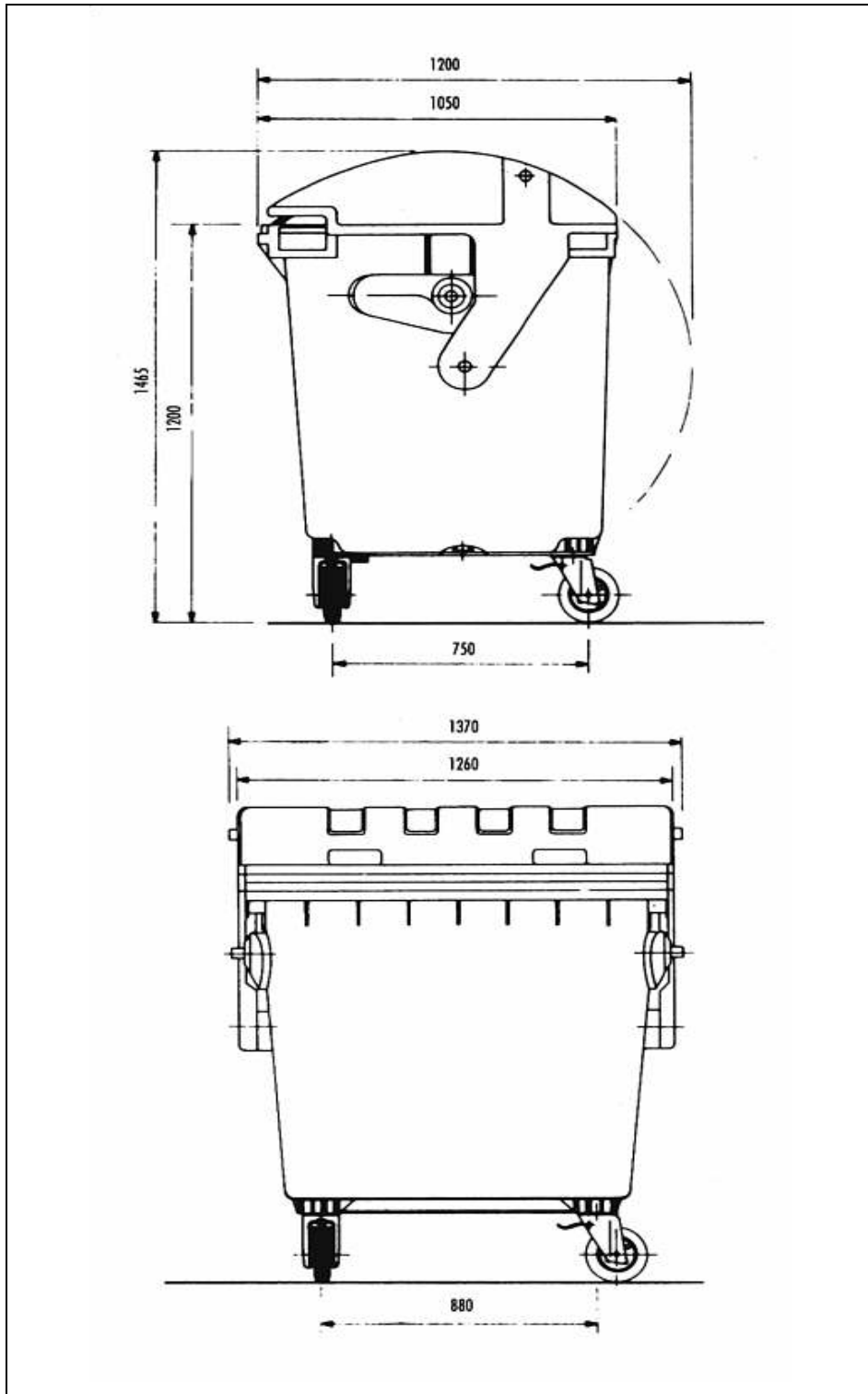


Fig. Cuerpo del contenedor de 1100 L.

Al realizar las simulaciones de inyección nos vamos a centrar únicamente en la fase de llenado, ya que los resultados que obtenemos de esta fase son donde mas diferencias vamos a encontrar entre los materiales analizados.

Para que todos los casos analizados con los distintos porcentajes de material reciclado sean comparables entre si, las condiciones de proceso utilizadas en las simulaciones de inyección van a se iguales para todos los materiales analizados, y son las siguientes:

<u>CONDICIONES DEL PROCESO</u>	
MATERIAL A INYECTAR	HD 5740 PE-HD RIGIDEZ
MATERIAL REFRIGERANTE	AGUA (PURA)
MATERIAL DE MOLDE Y MÁQUINA	ACERO H-13
TIEMPO DE LLENADO	15 segundos
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
T^a DE INYECCIÓN	230 °C
T^a DE REFRIGERACIÓN	30 °C
T^a CÁMARAS CALIENTES:	210 °C

Los resultados que vamos a analizar de cada simulación van a ser aquellos que se ven afectados directamente y en gran medida por la viscosidad del material utilizado para la inyección: presión máxima de inyección y fuerza de cierre máxima en el llenado.

A continuación se presentan los resultados del ensayo de simulación de inyección realizado a la geometría del contenedor de 1100L con el modelo viscoso obtenido del análisis del material virgen.

5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

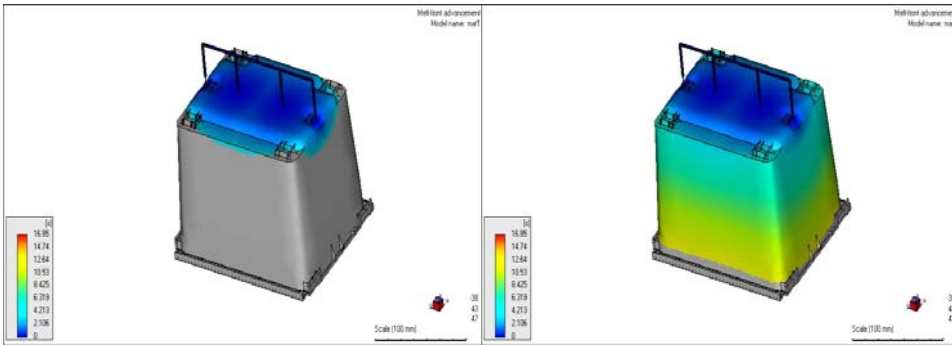


Fig. Llenado de la pieza.

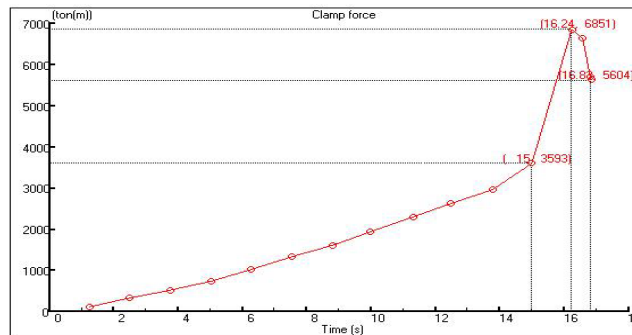


Fig. Evolución de la fuerza de cierre durante el llenado de la pieza.

Fuerza de cierre máxima 6850 Ton.

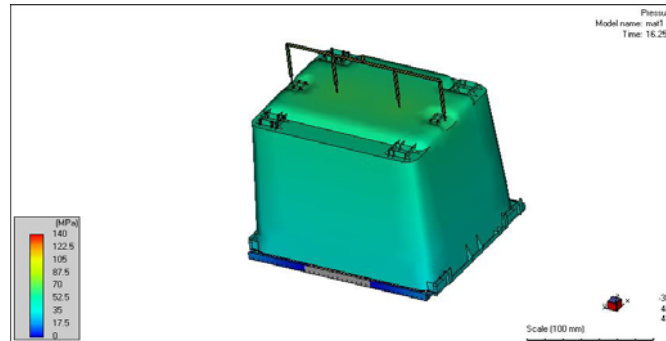


Fig. Distribución de presiones en el interior del molde al final del llenado.

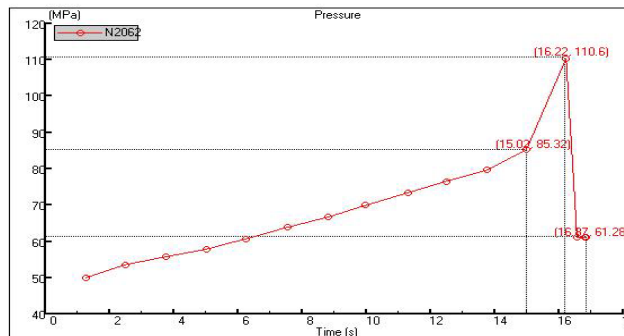


Fig. Evolución de la presión de inyección en el punto de entrada del molde, durante la fase de llenado. Presión máxima; 110 MPa.

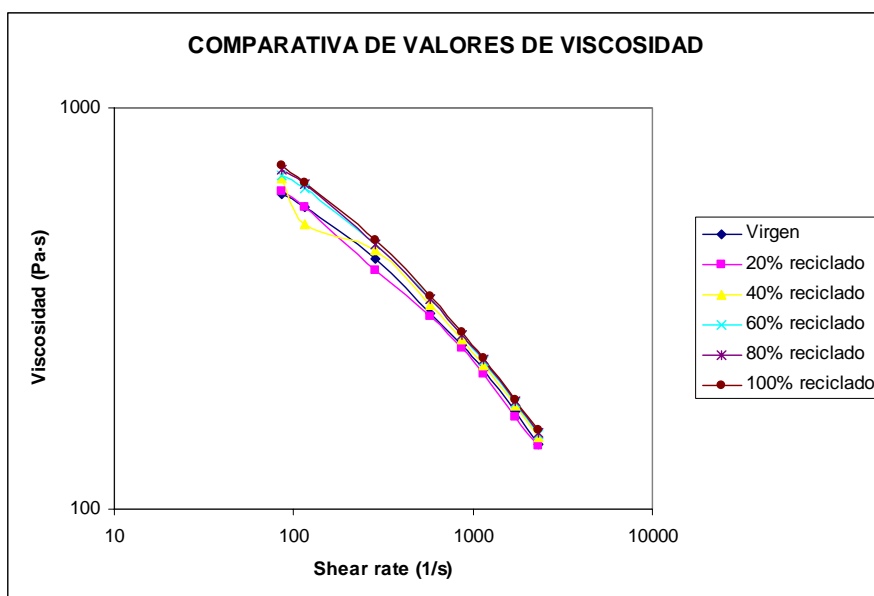
ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los primeros resultados que vamos a analizar son los valores de viscosidad recogidos del ensayo reológico.

Como la tendencia que muestran los resultados es la misma para cada temperatura, a continuación solo se presentan los resultados obtenidos del ensayo realizado a 230° C.

Viscosidad

S. RATE (1/s)	VIRGEN (Pa·s)	20% REC (Pa·s)	40% REC (Pa·s)	60% REC (Pa·s)	80% REC (Pa·s)	100% REC (Pa·s)
86	608	618	666	676	703	721
115	566	566	511	632	646	653
288	395	419	441	457	455	467
576	301	307	322	333	335	339
864	252	257	265	272	272	276
1150	217	222	228	234	235	238
1720	170	175	181	184	186	188
2300	144	145	151	154	155	157



5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

Los resultados recogidos en la tabla y el resto de resultados obtenidos al resto de temperaturas muestran un aumento del valor de la viscosidad conforme se incrementa el porcentaje de material reciclado en la muestra analizada.

<i>S. RATE</i> (1/s)	VIRGEN (Pa·s)	100% REC (Pa·s)	DIFERENCIA EN % VIGEN - RECICLADO
86	608	721	16 %
115	566	653	13 %
288	395	467	15 %
576	301	339	11 %
864	252	276	9 %
1150	217	238	9 %
1720	170	188	10 %
2300	144	157	8 %

En la tabla anterior se muestra el incremento en porcentaje que sufren los valores de viscosidad del material 100% reciclado analizado con respecto al material virgen, en función del valor de shear rate.

Se observa que para valores de shear rate bajos, la diferencia de viscosidad entre el material virgen y el material 100% reciclado puede ser hasta de un 16%, siendo siempre superior la viscosidad del material reciclado.

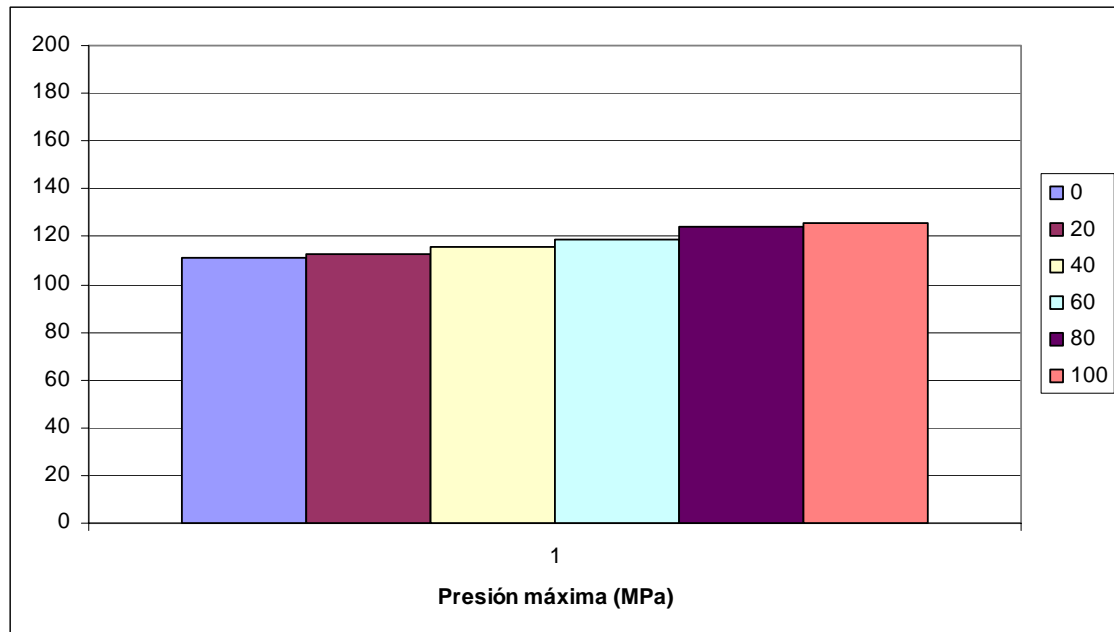
Para valores de shear rate medios, la diferencia de viscosidad entre el material virgen y el material 100% reciclado se mantiene más o menos constante en torno a un 10%.

A continuación vamos a analizar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con los distintos modelos viscosos.

No vamos a comparar todos los resultados de simulación, solo aquellos que son más significativos en la inyección y que están influenciados directamente por la variación de la viscosidad del material inyectado.

Presión máxima de inyección

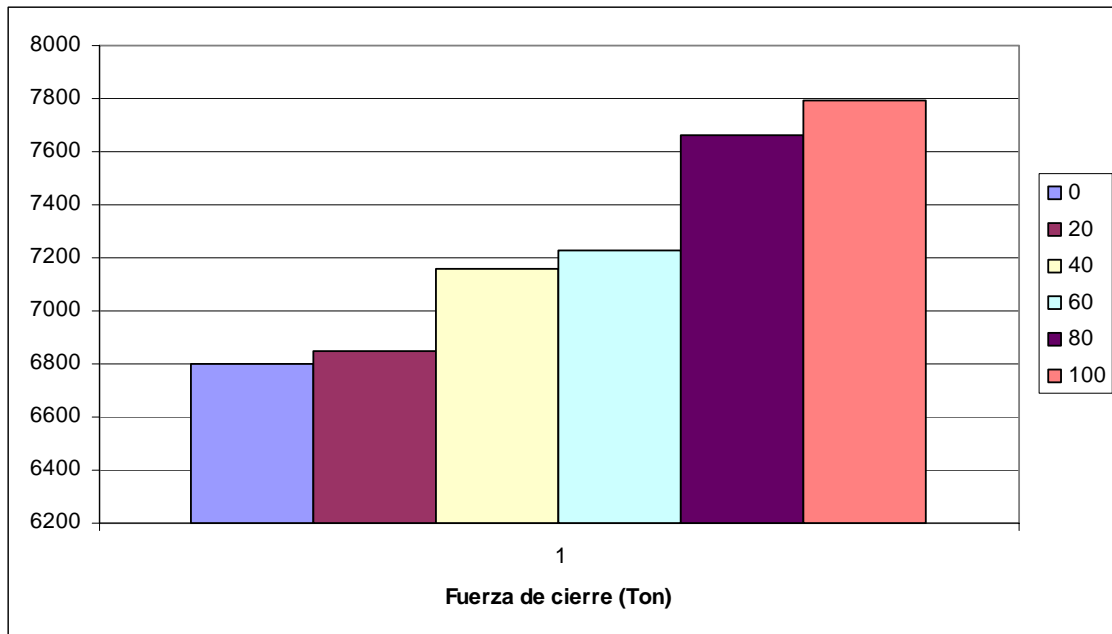
Virgen	111 MPa
20% Reciclado	113 MPa
40% Reciclado	116 MPa
60% Reciclado	119 MPa
80% Reciclado	124 MPa
100% Reciclado	126 MPa



Al igual que ocurría en la comparación de los valores de viscosidad, se observa que al aumentar el porcentaje de material reciclado en la simulación de inyección, la presión máxima de inyección aumenta; desde los 111 MPa del material virgen hasta los 126 MPa con un material 100% reciclado. En torno a un 12% de aumento de presión máxima de inyección.

Fuerza de cierre

Virgen	6800 Ton
20% Reciclado	6851 Ton
40% Reciclado	7198 Ton
60% Reciclado	7226 Ton
80% Reciclado	7663 Ton
100% Reciclado	7796 Ton



Los resultados de fuerza de cierre se corresponden claramente con los obtenidos en las presiones máximas de llenado. El valor de fuerza de cierre que necesita hacer la máquina de inyección para mantener el molde cerrado durante la inyección aumenta conforme aumenta el porcentaje de material reciclado en el material inyectado.

Como en los resultados de presión máxima de inyección obtenidos, el aumento que se observa en la fuerza de cierre al variar el material de virgen a 100% reciclado, supone el aumento en torno a un 12% de la fuerza de cierre necesaria para la inyección.

COMPARACIÓN CON LA BASE DE DATOS

Se realiza un análisis de simulación con el correspondiente modelo viscoso del material que posee la base de datos del programa de simulación. Estos resultados se comparan con los obtenidos de la simulación del material virgen con el modelo viscoso calculado con el reómetro.

Esta comparación es una forma de comprobar la validez de los modelos viscosos con el reómetro capilar.

Presión máxima de inyección

Material virgen	111 MPa
Base de datos	123 MPa

La simulación realizada con el modelo viscoso de la base de datos, proporciona valores de presión máxima de inyección aproximadamente un 10% superiores a los obtenidos con el modelo viscoso obtenido de forma experimental.

Fuerza de cierre

Material virgen	6800 Ton
Base de datos	7600 Ton

Se observa la misma tendencia que en la comparación de las presiones máximas de inyección, la fuerza de cierre requerida para la inyección del cuerpo del contenedor de 1100L es aproximadamente un 10% mayor en el caso de simulación con el modelo viscoso de la base de datos.

OBSERVACIONES

Con los ensayos, simulaciones y análisis realizados se pueden realizar las siguientes observaciones;

- Al aumentar el porcentaje de material reciclado se produce un aumento de la viscosidad, que si lo aplicamos a un proceso de inyección supone un aumento de presión de inyección y fuerza de cierre, parámetros que pueden ser determinantes en la viabilidad de inyección de una determinada geometría.
- El tamaño del material reciclado en relación con el material virgen utilizado es muy superior e irregular. Esto provoca dificultades para conseguir una mezcla homogénea y completamente fundida en el interior de la cámara de plastificación del reómetro. Hay que tener en cuenta que las cantidades de material utilizado para la realización de ensayos con el reómetros es a penas 20 gr. de material, que la diferencia de tamaño es considerable lo que provoca que el material virgen se concentre en la parte inferior de la cámara de plastificación, y que durante el proceso de fundición del material en el reómetro el material solo está sometido a temperatura y no a ninguna acción mecánica como en el husillo de una máquina de inyección. Para intentar compensar estos efectos, se aumentó el tiempo de residencia del material en la cámara de plastificación hasta 6 min. Esto provoca aumentar en gran cantidad el tiempo de realización de cada ensayo sin que por ello se pueda asegurar una homogeneidad de la mezcla de material analizado.
- El programa informático VISDAT ajusta las variables que se obtiene a través de la realización de unos ensayos experimentales, a una ecuación matemática de segundo orden. Este ajuste matemático de los valores de viscosidad permite calcular valores de viscosidad en condiciones de temperatura y shear rate diferentes a los ensayados experimentalmente.

- Para bajos porcentajes de material reciclado, la diferencia entre los resultados de simulación con materiales mezclados con material reciclado y los resultados obtenidos para el material virgen no son significativos.
- El aumento de la viscosidad para la empresa colaboradora en este proyecto, CONTENUR, es muy importante, ya que el aumento de la presión máxima de inyección y de la fuerza de cierre es determinante en la fabricación de sus piezas. Esto provoca que sea muy complicado o imposible el proceso de fabricación de las piezas de mayor tamaño con grandes concentraciones de material reciclado.
- Se ha observado que cada material ensayado con distinta concentración de material reciclado posee distintas características reológicas. En este tipo de piezas es importante valorarlo a la hora de introducir diferentes porcentajes de material reciclado.
- En la comparación entre los resultados de simulación obtenidos con el modelo viscoso del material virgen calculado con el reómetro capilar y los resultados de simulación obtenidos con el modelo viscoso de la base de datos del programa de simulación se observa que hay una diferencia del 10% entre los resultados obtenidos, resultando superiores los resultados obtenidos con el modelo viscoso de la base de datos del programa de simulación.

5.1.2.- Aplicación de la metodología a un material reciclado.

En los siguientes apartados se va a proceder a aplicar el método de caracterización descrito en el capítulo 4 a un material en concreto.

El material que se va a caracterizar es un PEHD de índice de fluidez 4, utilizado para fabricación de grandes contenedores. Este material se va a analizar aplicando la metodología desarrollada, tanto virgen como mezclado con distintos porcentajes del mismo material reciclado.

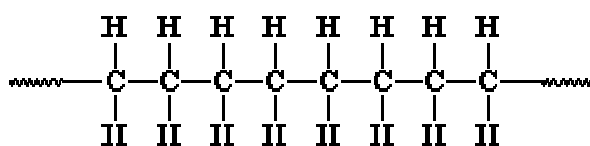
Se pretende analizar la influencia que tienen los distintos porcentajes de material reciclado sobre la viscosidad equivalente del PEHD ensayado.

El método de caracterización desarrollado es un método industrial por lo que al aplicar la metodología no solo caracterizamos el material que se inyecta en el molde espiral, sino que se analiza el material junto con variables del proceso propias del proceso industrial de transformación de plásticos, parámetros que afectan indirectamente a las condiciones en las que se inyecta el material.

5.1.2.1.- Descripción del material.

El material tanto virgen como reciclado que se ha utilizado para realizar los ensayos es un PEHD, *SABIC HDPE M40060S*, de índice de fluidez 4, utilizado para la fabricación de grandes contenedores para residuos sólidos urbanos.

El polietileno de alta densidad es un polímero de cadena lineal no ramificada, con una estructura como la que se muestra a continuación:



Sus propiedades mas características son; su ligereza de peso, poca permeabilidad al vapor, gran resistencia a impacto, resistencia térmica y química, buenas propiedades eléctricas y no es toxico. Por todos estos motivos es un material que frecuentemente se emplea para la fabricación de tuberías, envases, utensilios caseros y aislamientos eléctricos

El material empleado para la realización de este estudio ha sido suministrado por la empresa CONTENUR. Empresa líder en la fabricación y comercialización de mobiliario urbano, que abarca desde contenedores para la recogida de todo tipo de residuos urbanos, hasta parques infantiles.

En esta empresa el material con el que fabrica los contenedores es de gran importancia por varios motivos:

- Las cantidades de material tanto virgen como reciclado que se utilizan en la fabricación de un solo producto son muy elevadas.
- Debido al gran tamaño de las piezas, existe una gran limitación en la producción de piezas competitivas económicamente, debido al gran tonelaje de las maquinarias necesarias para fabricarlas. Por este motivo, la viscosidad de un material puede ser determinante para la viabilidad o no de la fabricación de una pieza. La presión de inyección y la fuerza de cierre necesaria para la fabricación de una pieza son parámetros críticos.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Material virgen

- El material ha sido suministrado por CONTENUR, fabricante de grandes contenedores para la recogida de residuos sólidos urbanos.
- Granulado de forma esférica de 2,5mm.
- Color; blanco.
- Estable frente a los rayos UV.
- Alta resistencia al impacto y a la tensión interna.
- Bajo alabeo.
- Recomendado para la fabricación por inyección de artículos como; paleas, grandes contenedores y piezas industriales.
- No necesita secado previo a la inyección.



Fig. Granza de SABIC M40060S virgen.

Material reciclado

- Material suministrado por CONTENUR.
- Se obtiene a partir de las piezas inyectadas con el material virgen anteriormente descrito, que no cumplen las especificaciones de calidad, ya sea por defectos estéticos o por deformación de pieza.
- Las piezas defectuosas se trituran en un molino hasta convertirlas en un granulado mas o menos grande (en función del molino utilizado), para que pueda ser mezclado con material virgen e introducido de nuevo en la tolva para ser inyectado.
- Tamaño muy irregular; desde polvo hasta 10mm.
- Color: verde alemán.
- No necesita secado previo a la inyección.



Fig. SABIC M40060S reciclado, color verde alemán.

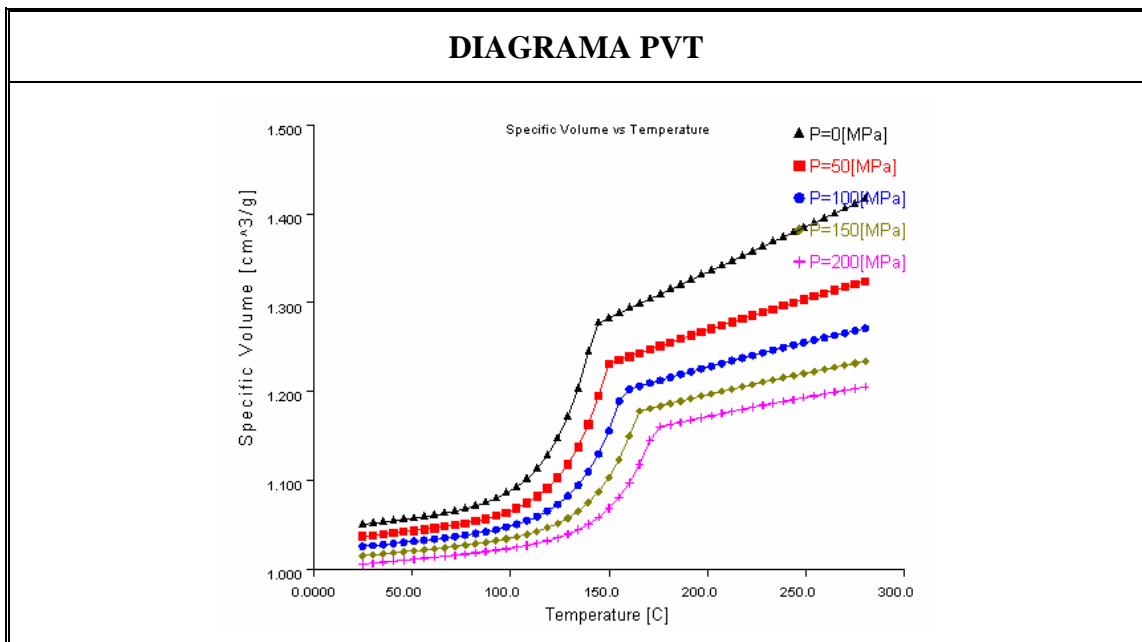
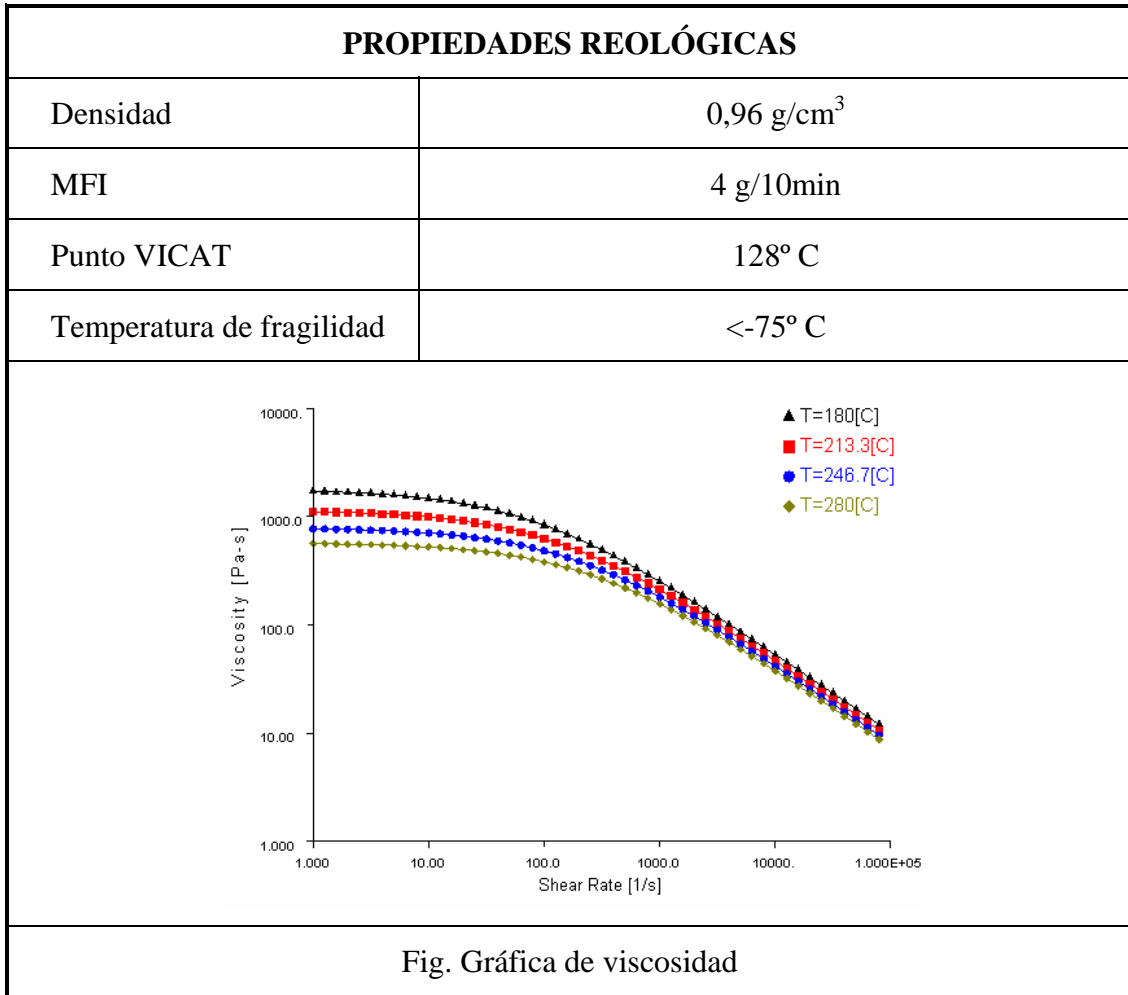
PROPIEDADES TERMOPLÁSTICAS

Las propiedades termoplásticas de este material (SABIC HDPE M40060S) facilitadas por el fabricante son:

CONDICIONES DE PROCESO RECOMENDADAS		
Temperatura del molde	Rango de T ^a recomendado	20 -40°C
Temperatura del material	Rango de T ^a recomendado	232 -260 °C
Presión de inyección	Rango de P recomendado	93 – 103 MPa
Temperatura de expulsión	115 °C	
Shear stress máximo.	0,2 MPa	
Shear rate máximo.	40000 1/s	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	Temperatura (T ^a)	Calor específico (C _p)
	230° C	2100 J/kg·C
Conductividad térmica	Temperatura (T ^a)	Conductividad térmica (K)
	230° C	0,15 W/m·C

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Tensión del 1% elongación	1240 MPa
Tensión elongación	33 MPa
Tensión de rotura	22 MPa
Tensión de elongación hasta rotura	1200 %
Impacto Izod	69 J/m
Dureza	69



5.1.2.2.- Aplicación del método de caracterización al material reciclado.

Tanto el material virgen como el material reciclado ya molido, han sido suministrados por CONTENUR.

Como veremos mas adelante, es importante que el material reciclado nos haya sido suministrado por la empresa ya molido. No todos los molinos destruyen y trituran las piezas inyectadas en granza del mismo tamaño, depende del tamaño del molino y del tamaño de la máquina en la que luego se va a introducir el material reciclado.

Contenur es una empresa que se dedica a la inyección de piezas de gran tamaño, por lo que tanto sus máquinas de 1500 a 8000 Ton, como su molino, son de gran tamaño. El material reciclado que genera es más bastante más grande que el tamaño del material virgen.

Este es un problema que se plantea cuando se quieren caracterizar materiales reciclados mediante un reómetro capilar. En este caso, la irregularidad del tamaño del material reciclado y su diferencia de tamaño respecto al material virgen, dificultan la homogeneidad de la muestra analizada mediante un reómetro capilar como se ha explicado más detalladamente en el apartado 5.1. “*Trabajos previos*”

Para solucionar este problema habría que introducirlo de nuevo en un molino que proporcionase material reciclado de menor tamaño. El tamaño del reciclado puede influir en el comportamiento viscoso del material reciclado por lo que no se correspondería el material analizado con el que luego es utilizado en la empresa para la fabricación de su producto.

Partiendo de material virgen y material 100% reciclado se realizan mezclas con el objeto de obtener los materiales con los distintos porcentajes de reciclado. Las proporciones se hacen por peso de material, que una vez bien mezclado se introduce en la tolva de la máquina de inyección para comenzar los ensayos.

Los ensayos se inician con el material virgen, y se va aumentando gradualmente el porcentaje de reciclado del material. Con esto se intenta asegurar que no queden restos de impurezas o de exceso de material reciclado en el husillo que pudiesen alterar los resultados de los ensayos.

Por otro lado, el husillo se purga con el nuevo material a ensayar varias veces antes de comenzar el ensayo, para cerciorar que el material sobre el que se van a realizar las mediciones es el que se había introducido en la tolva.

Antes de comenzar los ensayos debemos fijar las condiciones de los ensayos para que así sean todos comparables entre si:

Temperatura de material.

El material se analiza en tres temperaturas diferentes, que abarcan el mayor rango posible dentro de las temperaturas de inyección recomendadas por el fabricante del material.

Igual que en el apartado 4.1.5 “*Aplicación del método de caracterización a un polipropileno*”, las temperaturas a las que se van a realizar los ensayos deben ser validadas previamente junto con las velocidades de inyección, mediante ensayos de simulación para asegurar que cumplen la premisa del método desarrollado de que la diferencia de temperatura entre los puntos de medida no es superior a 2° C en cualquiera de las condiciones impuestas.

Tras la validación con análisis de simulación, se determina que las temperaturas a las que se realizan los ensayos son: 220°C, 240° C y 260° C

Velocidad de inyección.

No es un parámetro determinante, ya que luego de las medidas realizadas obtenemos el valor exacto de caudal que hemos introducido en cada inyectada. Pero de todas formas, debemos realizar los ensayos todos dentro de un mismo rango.

Las maquinas de inyección no trabajan con caudales, ya que en función de la presión y la temperatura a la que tengas el material en el husillo, un mismo volumen de material cargado puede introducirse a una mayor o menor velocidad provocando un mayor o menor caudal.

La máquina tiene un rango de velocidades a la que puede inyectar el material, el control se realiza mediante un porcentaje entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la máquina.

En nuestro caso abarcamos varias velocidades, ya que cada velocidad es un punto en la curva de una misma temperatura. Cuantos más puntos tengamos, más fácil le será al programa informático realizar la extrapolación para calcular la ecuación del modelo viscoso de segundo orden.

Como acabamos de mencionar, estas velocidades de máquina se validan junto con las temperaturas antes de realizar los ensayos, y así confirmar previamente la fiabilidad de los resultados que se van a obtener de las pruebas de inyección.

Las velocidades utilizadas; 20%, 30%, 40%, 55% y 70%.

Estas velocidades además hay que comprobarlas experimentalmente de manera que en el caso mas desfavorable, que el material circule lo mas lento posible esté llegue en un tiempo mínimo a los dos sensores para que pueda producirse el registro en ambos sensores, y que el tiempo no sea demasiado largo para que la diferencia de temperatura entre ambos puntos no sea superior a 2° C.

Por otro lado debemos controlar que en el caso del material con mayor fluidez, este no se sale del molde.

Presión de corte.

El molde espiral es un molde abierto por lo que la pieza en principio no se compacta. Para nuestro ensayo tampoco es necesario ya que solo necesitamos los valores de presión que alcanzan los sensores cuando el material llega a ambos.

Por estos motivos, no vamos a realizar la segunda fase o compactación en las inyecciones que vamos a realizar ya que no nos van a aportar ningún valor significativo para nuestro estudio.

Por otro lado el cambio que da por finalizada la fase de llenado va a ser una presión máxima de inyección que nosotros vamos a determinar en los controles de la máquina.

El valor que determinamos es de 80bar.

Tiene que ser lo suficientemente grande para que al igual que pasaba en el caso de las temperaturas, el material alcance los dos sensores para poder calcular la caída de presión entre ellos. Tampoco debe ser muy grande para no abrir el molde ni desperdiciar demasiado material en los casos de fluidez más favorable.

Para cada material se ensayan a las 5 velocidades cada una de las temperaturas con una presión de corte determinada. Para cada material y cada condición se realizan 2 inyectadas para mediar los resultados obtenidos

Bajo estas condiciones se realizan los ensayos experimentales de los que se obtienen los resultados de presión en cada uno de los sensores y el tiempo transcurrido desde que el material alcanza el primer sensor hasta que llega al segundo.

En las siguientes tablas se recogen los resultados numéricos obtenidos para cada uno de los ensayos realizados en las diferentes condiciones de proceso impuestas:

MATERIAL VIRGEN					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1942	448,393	3,377	445,016
		0,1926	454,5	3,377	451,123
	30	0,1284	480,607	1,039	479,568
		0,127	479,5	2,078	477,422
	40	0,097	503,522	2,598	500,924
		0,0968	504,326	2,338	501,988
	55	0,0734	520,81	2,078	518,732
		0,073	526,07	1,819	524,251
	70	0,0562	553,867	1,299	552,568
		0,0558	537,5	1,559	535,941
240	20	0,194	427,087	2,598	424,489
		0,1898	421,347	2,338	419,009
	30	0,13	452,069	2,078	449,991
		0,1284	450,888	2,078	448,81
	40	0,0992	469,852	2,338	467,514
		0,0984	471,23	1,819	469,411
	55	0,071	490,052	1,559	488,493
		0,0742	494,041	2,078	491,963
	70	0,056	506,575	1,559	505,016
		0,0592	510,81	2,598	508,212
260	20	0,193	395,318	1,559	393,759
		0,191	392,162	2,858	389,304
	30	0,1316	420,753	2,598	418,155
		0,131	423,208	2,858	420,35
	40	0,103	439,642	2,598	437,044
		0,1006	440,461	2,598	437,863
	55	0,0778	459,934	2,598	457,336
		0,0762	456,895	2,598	454,297
	70	0,0598	478,522	2,598	475,924
		0,0608	480,041	2,338	477,703

MATERIAL 20% RECICLADO					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1924	456,717	3,377	453,34
		0,1918	453,781	2,338	451,443
	30	0,132	480,984	2,858	478,126
		0,1312	483,842	1,559	482,283
	40	0,0972	511,781	2,338	509,443
		0,0966	501,39	2,338	499,052
	55	0,0718	529,006	2,338	526,668
		0,0734	533,123	2,338	530,785
	70	0,0582	548,269	1,559	546,71
		0,0584	544,931	2,338	542,593
240	20	0,1878	430,493	2,858	427,635
		0,19	428,895	1,559	427,336
	30	0,1292	453,329	1,819	451,51
		0,1294	457	1,819	455,368
	40	0,0986	478,479	2,338	476,141
		0,0986	473,685	2,598	471,087
	55	0,0718	495,742	1,819	493,923
		0,076	500,134	2,598	497,536
	70	0,0589	513,226	1,819	511,407
		0,061	507,5	2,858	504,642
260	20	0,1924	399,813	3,377	396,436
		0,1906	393,5	2,858	390,642
	30	0,1296	428,027	2,858	425,169
		0,128	425,35	2,858	422,492
	40	0,0958	440,237	1,819	438,418
		0,0996	450,927	2,858	448,069
	55	0,0718	468,465	1,819	466,646
		0,0714	470,244	2,078	468,166
	70	0,0564	485,65	1,559	484,091
		0,0562	478,272	1,559	476,713

MATERIAL 40% RECICLADO					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1938	460,835	3,117	457,718
		0,1894	458,6	2,598	456,002
	30	0,1286	487,244	2,338	484,906
		0,1302	490,842	2,858	487,984
	40	0,0998	508,561	1,559	507,002
		0,0992	505,561	2,078	503,483
	55	0,073	532,305	2,338	529,967
		0,0726	532,241	2,338	529,903
	70	0,0588	548,308	2,338	545,97
		0,0578	552,166	2,338	549,828
240	20	0,1972	435,222	3,117	432,105
		0,197	433,703	3,377	430,326
	30	0,1316	465,618	2,858	462,76
		0,1294	462,682	2,858	459,824
	40	0,0994	480,322	2,858	477,464
		0,1008	483,66	2,858	480,802
	55	0,0746	506,354	1,819	504,535
		0,0744	500,262	2,598	497,664
	70	0,0594	520,461	2,598	517,863
		0,06	518,162	1,819	516,343
260	20	0,192	403,97	3,117	400,853
		0,1984	396,436	3,117	393,319
	30	0,1328	430,585	2,858	427,727
		0,1286	426,649	2,078	424,571
	40	0,1028	444,682	2,858	441,824
		0,1038	448,304	2,858	445,446
	55	0,0774	472,479	2,858	469,621
		0,074	467,219	2,598	464,621
	70	0,0592	490,262	2,598	487,664
		0,058	487,963	2,598	485,365

MATERIAL 60% RECICLADO					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1948	466,137	3,377	462,76
		0,1962	460,343	3,377	456,966
	30	0,1342	492,052	3,377	488,675
		0,1332	490,571	3,117	487,454
	40	0,0996	512,81	3,377	509,433
		0,1	515,81	3,117	512,693
	55	0,0728	537,436	3,377	534,059
		0,0742	542,308	3,377	538,931
	70	0,0532	564,308	1,039	563,269
		0,0508	566,387	1,039	565,348
240	20	0,157	449,158	3,117	446,041
		0,1638	450,155	1,819	448,336
	30	0,1036	480,78	2,078	478,702
		0,1004	481,863	2,078	479,785
	40	0,072	485,411	2,078	483,333
		0,078	489,375	1,559	487,816
	55	0,0736	487,265	0,779	486,486
		0,0648	484,223	2,078	482,145
	70	0,0494	536,383	1,299	535,084
		0,0492	534,967	1,039	533,928
260	20	0,19	406,048	1,819	404,229
		0,1872	400,162	1,299	398,863
	30	0,13	430,61	1,299	429,311
		0,131	428,649	1,299	427,35
	40	0,095	448,628	1,039	447,589
		0,1028	454,24	1,299	452,941
	55	0,0736	468,998	0,52	468,478
		0,0758	472,635	0,779	471,856
	70	0,058	562,458	1,299	561,159
		0,0438	558,988	1,299	557,689

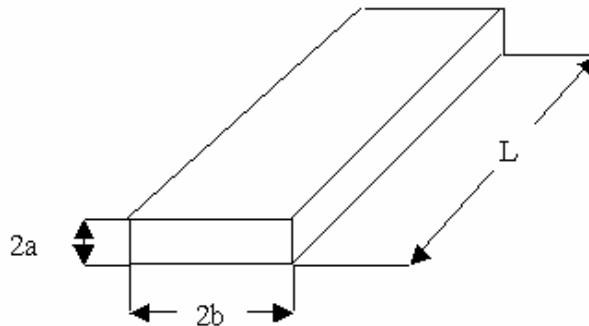
MATERIAL 80% RECICLADO					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1756	472,123	1,039	471,084
		0,1726	469,614	1,559	468,055
	30	0,1216	498,66	1,039	497,621
		0,126	496,518	1,039	495,479
	40	0,0944	517,757	0,779	516,978
		0,0936	517,757	1,559	516,198
	55	0,0686	546,358	1,039	545,319
		0,068	547,917	0,779	547,138
	70	0,0546	566,842	1,299	565,543
		0,0528	569,063	1,819	567,244
240	20	0,1644	449,301	1,299	448,002
		0,162	450,874	1,039	449,835
	30	0,1158	472,5	1,299	471,201
		0,1192	469,589	1,039	468,55
	40	0,0926	482,568	0,26	482,308
		0,0978	489,543	0,26	489,283
	55	0,0692	507,963	0,26	507,703
		0,074	510,561	0,779	509,782
	70	0,0578	531,383	0,26	531,123
		0,058	529,604	0,52	529,084
260	20	0,1576	421,19	0,26	420,93
		0,1648	417,151	1,299	415,852
	30	0,1268	434,546	0,779	433,767
		0,127	437,286	0,26	437,026
	40	0,0998	452,642	0,52	452,122
		0,1014	454,084	0,26	453,824
	55	0,0772	472,454	1,039	471,415
		0,073	476,062	0,779	475,283
	70	0,058	500,885	0,52	500,365
		0,0584	496,532	0,779	495,753

MATERIAL 100% RECICLADO					
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	TIEMPO (s)	P 1 ^{er} sensor (Bar)	P 2 ^o sensor (Bar)	ΔP (Bar)
220	20	0,1914	460,642	1,039	459,603
		0,1868	455,849	1,039	454,81
	30	0,121	493,077	0,26	492,817
		0,133	503,208	1,039	502,169
	40	0,0888	518,198	0,26	517,938
		0,0938	519,055	0,26	518,795
	55	0,069	549,97	1,039	548,931
		0,0696	534,383	0,26	534,123
70	0,0586	552,757	0,779	551,978	
	0,0566	550,582	1,039	549,543	
240	20	0,1702	430,988	0,26	430,728
		0,181	428,13	0,779	427,351
	30	0,1218	466,5	0,52	465,98
		0,1294	465,279	0,26	465,019
	40	0,099	489,959	0,26	489,699
		0,1008	493,077	0,52	492,557
	55	0,0714	510,482	0,52	509,962
		0,0718	508,389	0,26	508,129
70	0,0596	538,643	0,52	538,123	
	0,0584	545,295	0,26	545,035	
260	20	0,19	399,813	0,26	399,553
		0,184	393,318	0,52	392,798
	30	0,1256	430,493	0,26	430,233
		0,121	435,265	0,52	434,745
	40	0,0932	455,148	0,26	454,888
		0,0954	453,771	0,52	453,251
	55	0,072	488,92	0,52	488,4
		0,0746	487,881	0,52	487,361
70	0,0546	502,169	0,52	501,649	
	0,0566	509,443	1,299	508,144	

5.1.2.3.- Cálculo del modelo viscoso equivalente.

De los registros de presión obtenidos sacamos dos valores que nos interesan de forma especial para poder calcular la viscosidad equivalente del material de cada ensayo, la diferencia de presión entre los dos sensores en el momento en el que el material alcanza el segundo sensor y el tiempo que tarda el material en recorrer la distancia que separa los dos sensores.

A través de la geometría de la espiral y de su molde, conocemos la sección de paso de la espiral y la distancia que existe entre los dos puntos donde se sitúan los sensores de presión, por lo que, podemos calcular el volumen que hay entre los dos puntos del molde donde se sitúan los sensores de presión. Este valor es constante y común para todos los ensayos ya que depende únicamente de la geometría de la pieza y de la del molde



-Sección de la espiral: $2a = 0,002\text{m} = 0,2\text{cm}$
 $2b = 0,02\text{m} = 2\text{cm}$

-Distancia entre los sensores: $L = 0,085\text{m} = 8,5\text{cm}$

$$V = 2a \cdot 2b \cdot 0,085 = 0,2 \cdot 2 \cdot 8,5 = 3,4 \text{ cm}^3$$

5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

El caudal de inyección correspondiente a cada ensayo se calcula a partir del volumen calculado anteriormente; $3,4 \text{ cm}^3$, dividido entre el tiempo transcurrido entre la primera señal recibida por cada sensor.

Este valor si que es diferente para cada ensayo ya que depende de uno de los resultados que recogemos directamente de los sensores de presión.

$$Q(\text{cm}^3 / \text{s}) = \frac{V}{t} = \frac{3,4}{t}$$

Con el caudal correspondiente a cada ensayo y los valores geométricos de la sección de la espiral, se calcula el shear rate o velocidad de cizalla. Observando la ecuación que se presenta a continuación, se comprueba, que el único valor del que depende este parámetro el es tiempo que le cuesta recorrer al material la distancia entre los dos sensores, en cada ensayo.

$$\gamma = \frac{3 \cdot Q}{4 \cdot a^2 \cdot b} = \frac{3 \cdot \left(\frac{0.0000034}{t} \right)}{4 \cdot 0,001^2 \cdot 0.01} = \frac{255}{t} (\text{s}^{-1})$$

(Unidades del sistema internacional m y s)

El shear stress se obtiene a partir de la caída de presión que se recoge en cada ensayo. El resto de parámetros de los que depende son constantes en nuestros ensayos ya que dependen de la geometría de la espiral y del molde

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot a}{L} = \frac{\Delta P \cdot 0,001}{0,085} = 0,0117 \cdot \Delta P$$

(Unidades del sistema internacional Pa·s y m)

Como hemos detallado en capítulos anteriores, la viscosidad de los fundidos analizados la definimos con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

Sustituyendo los parámetros conocidos, observamos que podemos simplificar la ecuación de forma que vemos la dependencia directa de la viscosidad equivalente de la caída de presión entre los puntos analizados y el tiempo transcurrido desde que el fundido llega al primer sensor hasta que alcanza el segundo.

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0,0117 \cdot \Delta P}{\frac{255}{t}} = 0.0000461 \cdot \Delta P \cdot t$$

Con la aplicación de esta ecuación se obtienen los valores de viscosidad equivalente a partir de los valores recogidos de los sensores de presión para cada ensayo realizado, que se presentan a continuación en tablas.

MATERIAL VIRGEN							
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)	
220	20	0,1942	45091246	1313	530485	404	
		0,1926	45710038	1324	537765	406	
	30	0,1284	48592228	1986	571673	288	
		0,127	48374784	2008	569115	283	
	40	0,097	50756124	2629	597131	227	
		0,0968	50863934	2634	598399	227	
	55	0,0734	52560520	3474	618359	178	
		0,073	53119733	3493	624938	179	
	70	0,0562	55988953	4537	658694	145	
		0,0558	54304222	4570	638873	140	
	240	20	0,194	43011348	1314	506016	385
			0,1898	42456087	1344	499483	372
		30	0,13	45595338	1962	536416	273
			0,1284	45475673	1986	535008	269
40		0,0992	47370856	2571	557304	217	
		0,0984	47563070	2591	559566	216	
55		0,071	49496553	3592	582312	162	
		0,0742	49848151	3437	586449	171	
70		0,056	51170746	4554	602009	132	
		0,0592	51494581	4307	605819	141	
260		20	0,193	39897631	1321	469384	355
			0,191	39446228	1335	464073	348
		30	0,1316	42369555	1938	498465	257
			0,131	42591964	1947	501082	257
	40	0,103	44283483	2476	520982	210	
		0,1006	44366468	2535	521958	206	
	55	0,0778	46339570	3278	545171	166	
		0,0762	46031644	3346	541549	162	
	70	0,0598	48222999	4264	567329	133	
		0,0608	48403256	4194	569450	136	

MATERIAL 20% RECICLADO						
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
220	20	0,1924	45934676	1325	540408	408
		0,1918	45742462	1330	538147	405
	30	0,132	48446117	1932	569954	295
		0,1312	48867325	1944	574910	296
	40	0,0972	51619312	2623	607286	231
		0,0966	50566444	2640	594899	225
	55	0,0718	53364635	3552	627819	177
		0,0734	53781790	3474	632727	182
	70	0,0582	55395391	4381	651710	149
		0,0584	54978236	4366	646803	148
240	20	0,1878	43330116	1358	509766	375
		0,19	43299820	1342	509410	380
	30	0,1292	45749251	1974	538226	273
		0,1294	46140163	1971	542825	275
	40	0,0986	48244987	2586	567588	219
		0,0986	47732890	2586	561563	217
	55	0,0718	50046748	3552	588785	166
		0,076	50412835	3355	593092	177
	70	0,0589	51818314	4329	609627	141
		0,061	51132851	4180	601563	144
260	20	0,1924	40168878	1325	472575	357
		0,1906	39581801	1338	465668	348
	30	0,1296	43080249	1968	506826	258
		0,128	42809002	1992	503635	253
	40	0,0958	44422704	2662	522620	196
		0,0996	45400591	2560	534125	209
	55	0,0718	47282906	3552	556269	157
		0,0714	47436920	3571	558081	156
	70	0,0564	49050521	4521	577065	128
		0,0562	48302945	4537	568270	125

MATERIAL 40% RECICLADO						
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
220	20	0,1938	46378276	1316	545627	415
		0,1894	46204403	1346	543581	404
	30	0,1286	49133100	1983	578036	292
		0,1302	49444979	1959	581706	297
	40	0,0998	51371978	2555	604376	237
		0,0992	51015415	2571	600181	233
	55	0,073	53698906	3493	631752	181
		0,0726	53692421	3512	631676	180
	70	0,0588	55320410	4337	650828	150
		0,0578	55711322	4412	655427	149
240	20	0,1972	43783039	1293	515095	398
		0,197	43602782	1294	512974	396
	30	0,1316	46889157	1938	551637	285
		0,1294	46591667	1971	548137	278
	40	0,0994	48379040	2565	569165	222
		0,1008	48717263	2530	573144	227
	55	0,0746	51122009	3418	601435	176
		0,0744	50425805	3427	593245	173
	70	0,0594	52472468	4293	617323	144
		0,06	52318454	4250	615511	145
260	20	0,192	40616430	1328	477840	360
		0,1984	39853048	1285	468859	365
	30	0,1328	43339438	1920	509876	266
		0,1286	43019657	1983	506114	255
	40	0,1028	44767817	2481	526680	212
		0,1038	45134816	2457	530998	216
	55	0,0774	47584348	3295	559816	170
		0,074	47077723	3446	553856	161
	70	0,0592	49412555	4307	581324	135
		0,058	49179609	4397	578584	132

MATERIAL 60% RECICLADO						
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
220	20	0,1948	46889157	1309	551637	421
		0,1962	46302080	1300	544730	419
	30	0,1342	49514994	1900	582529	307
		0,1332	49391277	1914	581074	304
	40	0,0996	51618299	2560	607274	237
		0,1	51948618	2550	611160	240
	55	0,0728	54113528	3503	636630	182
		0,0742	54607184	3437	642437	187
	70	0,0532	57073231	4793	671450	140
		0,0508	57283886	5020	673928	134
240	20	0,157	45195104	1624	531707	327
		0,1638	45427645	1557	534443	343
	30	0,1036	48504480	2461	570641	232
		0,1004	48614215	2540	571932	225
	40	0,072	48973716	3542	576161	163
		0,078	49427956	3269	581505	178
	55	0,0736	49293194	3465	579920	167
		0,0648	48853342	3935	574745	146
	70	0,0494	54217386	5162	637852	124
		0,0492	54100255	5183	636474	123
260	20	0,19	40958503	1342	481865	359
		0,1872	40414793	1362	475468	349
	30	0,13	43499937	1962	511764	261
		0,131	43301239	1947	509426	262
	40	0,095	45351955	2684	533552	199
		0,1028	45894247	2481	539932	218
	55	0,0736	47468533	3465	558453	161
		0,0758	47810809	3364	562480	167
	70	0,058	56859436	4397	668935	152
		0,0438	56507838	5822	664798	114

MATERIAL 80% RECICLADO						
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
220	20	0,1756	47732586	1452	561560	387
		0,1726	47425673	1477	557949	378
	30	0,1216	50421448	2097	593194	283
		0,126	50204410	2024	590640	292
	40	0,0944	52382796	2701	616268	228
		0,0936	52303762	2724	615338	226
	55	0,0686	55254448	3717	650052	175
		0,068	55438758	3750	652221	174
	70	0,0546	57303644	4670	674161	144
		0,0528	57475998	4830	676188	140
240	20	0,1644	45393803	1551	534045	344
		0,162	45579531	1574	536230	341
	30	0,1158	47744441	2202	561699	255
		0,1192	47475829	2139	558539	261
	40	0,0926	48869858	2754	574940	209
		0,0978	49576600	2607	583254	224
	55	0,0692	51443006	3685	605212	164
		0,074	51653661	3446	607690	176
	70	0,0578	53816038	4412	633130	144
		0,058	53609436	4397	630699	143
260	20	0,1576	42650732	1618	501773	310
		0,1648	42136204	1547	495720	320
	30	0,1268	43951441	2011	517076	257
		0,127	44281659	2008	520961	259
	40	0,0998	45811262	2555	538956	211
		0,1014	45983717	2515	540985	215
	55	0,0772	47766125	3303	561954	170
		0,073	48158050	3493	566565	162
	70	0,058	50699484	4397	596465	136
		0,0584	50232173	4366	590967	135

MATERIAL 100% RECICLADO						
T ^a (°C)	% v	t (s)	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	STRESS (Pa)	VIS (Pa·s)
220	20	0,1914	46569274	1332	547874	411
		0,1868	46083623	1365	542160	397
	30	0,121	49934683	2107	587467	279
		0,133	50882274	1917	598615	312
	40	0,0888	52480068	2872	617413	215
		0,0938	52566903	2719	618434	227
	55	0,069	55620434	3696	654358	177
		0,0696	54120013	3664	636706	174
	70	0,0586	55929171	4352	657990	151
		0,0566	55682444	4505	655088	145
240	20	0,1702	43643515	1498	513453	343
		0,181	43301340	1409	509428	362
	30	0,1218	47215424	2094	555476	265
		0,1294	47118050	1971	554330	281
	40	0,099	49618751	2576	583750	227
		0,1008	49908338	2530	587157	232
	55	0,0714	51671900	3571	607905	170
		0,0718	51486171	3552	605720	171
	70	0,0596	54525313	4279	641474	150
		0,0584	55225671	4366	649714	149
260	20	0,19	40484708	1342	476291	355
		0,184	39800257	1386	468238	338
	30	0,1256	43593359	2030	512863	253
		0,121	44050537	2107	518242	246
	40	0,0932	46091527	2736	542253	198
		0,0954	45925658	2673	540302	202
	55	0,072	49487130	3542	582202	164
		0,0746	49381853	3418	580963	170
	70	0,0546	50829585	4670	597995	128
		0,0566	51487691	4505	605738	134

Con los dos valores de viscosidad equivalente y shear rate obtenidos para cada una de las condiciones impuestas, se hace una media y se obtiene un único valor para cada condición de ensayo.

Se representan los valores resultantes en una gráfica doble logarítmica.

MATERIAL VIRGEN			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1319	405
	30	1997	286
	40	2632	227
	55	3484	178
	70	4554	142
240	20	1329	378
	30	1974	271
	40	2581	216
	55	3514	166
	70	4431	136
260	20	1328	351
	30	1942	257
	40	2505	208
	55	3312	164
	70	4229	134

MATERIAL VIRGEN

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

MATERIAL 20% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1328	406
	30	1938	295
	40	2632	228
	55	3513	179
	70	4374	148
240	20	1350	377
	30	1972	274
	40	2586	218
	55	3453	171
	70	4255	142
260	20	1332	352
	30	1980	255
	40	2611	202
	55	3561	156
	70	4529	126

MATERIAL 20% RECICLADO

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

MATERIAL 40% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1331	409
	30	1971	294
	40	2563	235
	55	3503	180
	70	4374	149
240	20	1294	397
	30	1954	281
	40	2548	224
	55	3423	174
	70	4271	144
260	20	1307	362
	30	1952	260
	40	2469	214
	55	3370	165
	70	4352	133

MATERIAL 40% RECICLADO

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

MATERIAL 60% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1304	420
	30	1907	305
	40	2555	238
	55	3470	184
	70	4906	137
240	20	1590	335
	30	2501	228
	40	3541	170
	55	3935	156
	70	5172	123
260	20	1352	354
	30	1954	261
	40	2582	208
	55	3414	164
	70	4397	133

MATERIAL 60% RECICLADO

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

MATERIAL 80% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1465	382
	30	2060	287
	40	2713	227
	55	3734	174
	70	4750	142
240	20	1563	342
	30	2171	258
	40	2681	216
	55	3565	170
	70	4404	143
260	20	1583	315
	30	2009	258
	40	2535	213
	55	3398	166
	70	4381	135

MATERIAL 80% RECICLADO

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

MATERIAL 100% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa·s)
220	20	1349	404
	30	2012	295
	40	2795	221
	55	3680	175
	70	4505	148
240	20	1454	352
	30	2032	273
	40	2553	229
	55	3571	170
	70	4279	149
260	20	1364	346
	30	2030	249
	40	2705	200
	55	3480	167
	70	4588	131

MATERIAL 100% RECICLADO

VISCOSIDAD EQUIVALENTE (PA·S)
 SHEAR RATE (S-1)

● $T^a=220^\circ\text{C}$
 ■ $T^a=240^\circ\text{C}$
 ▲ $T^a=260^\circ\text{C}$

Introduciendo estos pares de valores de shear rate frente a los valores de viscosidad equivalente en el VISDAT, se obtienen los valores de las seis constantes que definen la ecuación del modelo viscoso de segundo orden para cada material.

Ecuación de un modelo viscoso de 2º orden:

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\gamma) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \ln(\gamma)^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\gamma) + A_5 \cdot T^2$$

Donde:

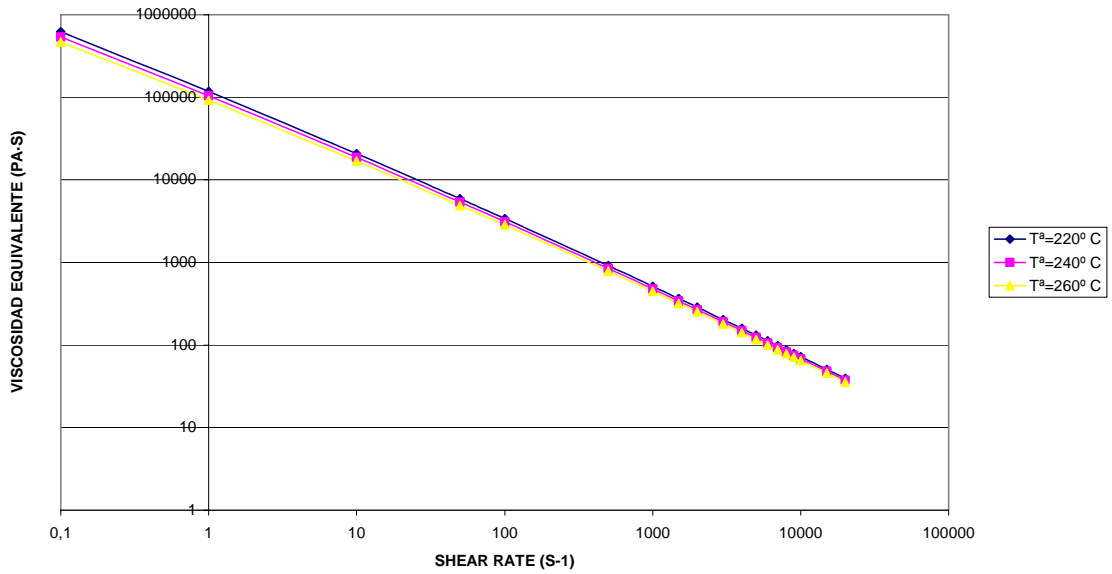
- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

MATERIAL	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Virgen	13,232	-0,819	-7,869E-03	-7,199E-03	3,727E-04	3,64E-06
20% reciclado	12,577	-0,801	-2,892E-03	-7,579E-03	3,229E-04	-5,990E-06
40% reciclado	12,239	-0,851	1,639E-03	-6,114E-03	4,280E-04	-1,697E-05
60% reciclado	12,38	-0,793	-1,377E-03	-8,260E-03	3,427E-04	-9,539E-06
80% reciclado	13,09	-0,887	-4,363E-03	-1,416E-03	2,916E-04	-2,123E-06
100% reciclado	12,052	-0,745	-1,011E-04	-8,190E-03	1,190E-04	-8,332E-06

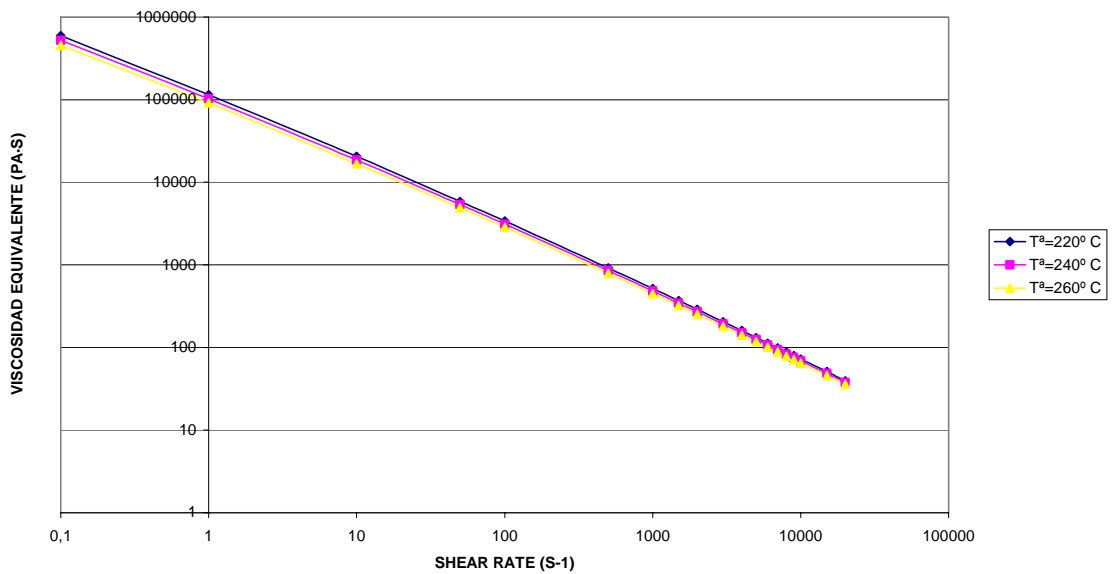
5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

Las curvas de viscosidad equivalente obtenidas para cada material se representan a continuación:

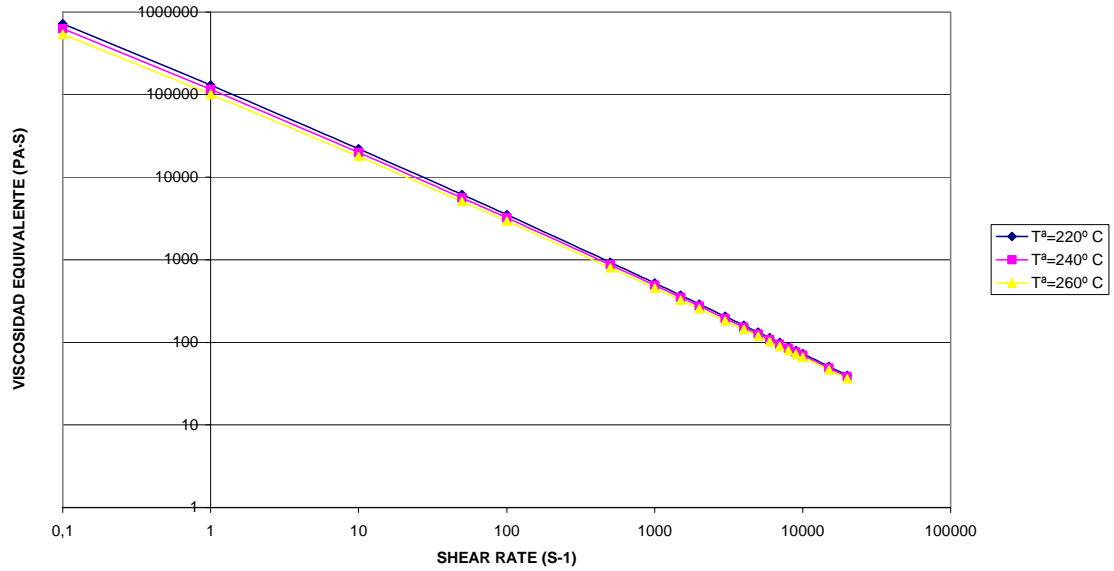
MATERIAL VIRGEN



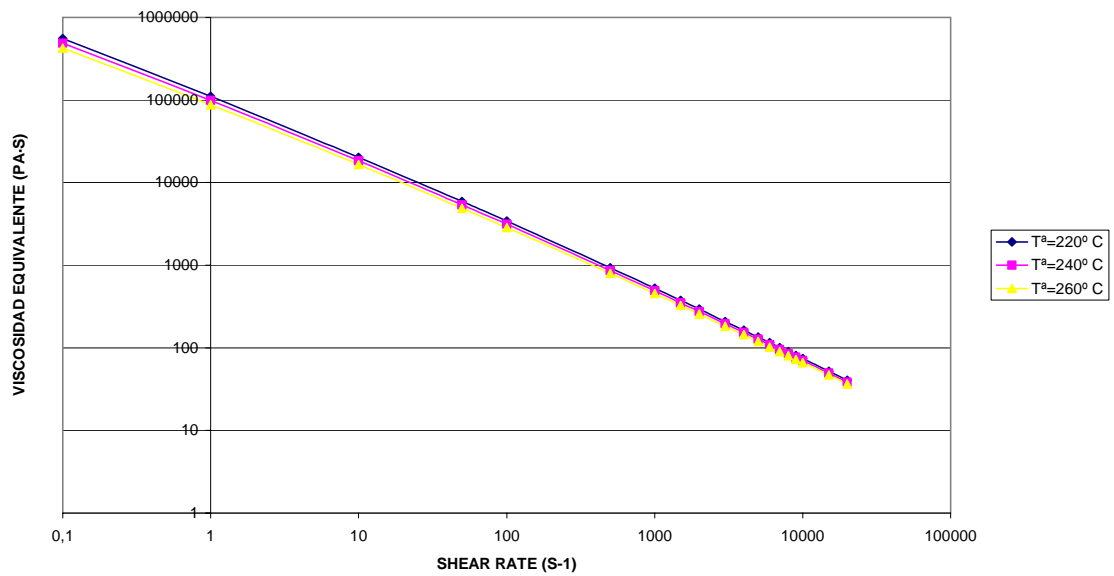
MATERIAL 20% RECICLADO



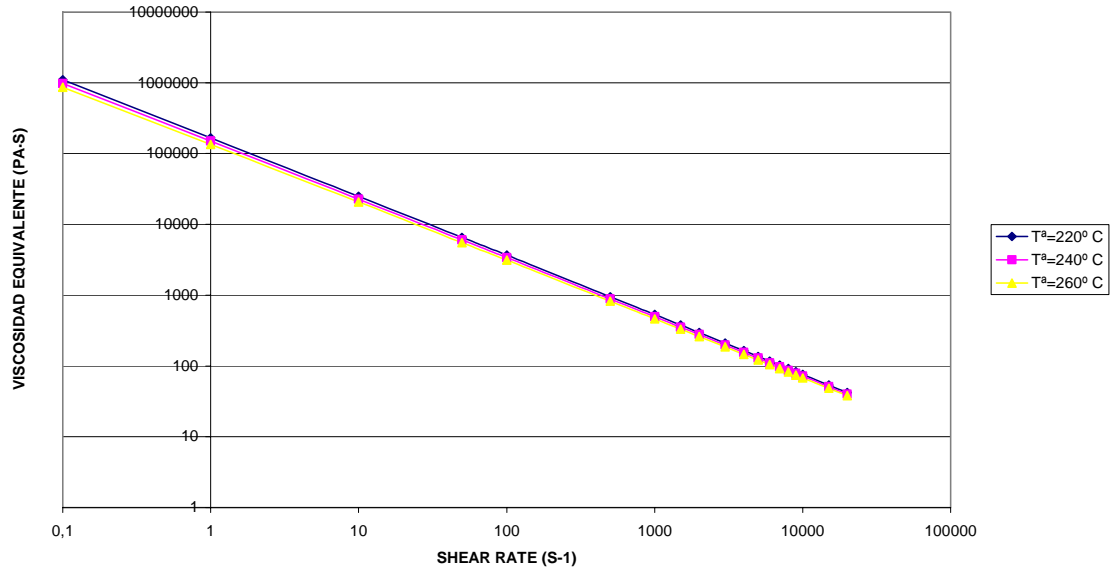
MATERIAL 40% RECICLADO



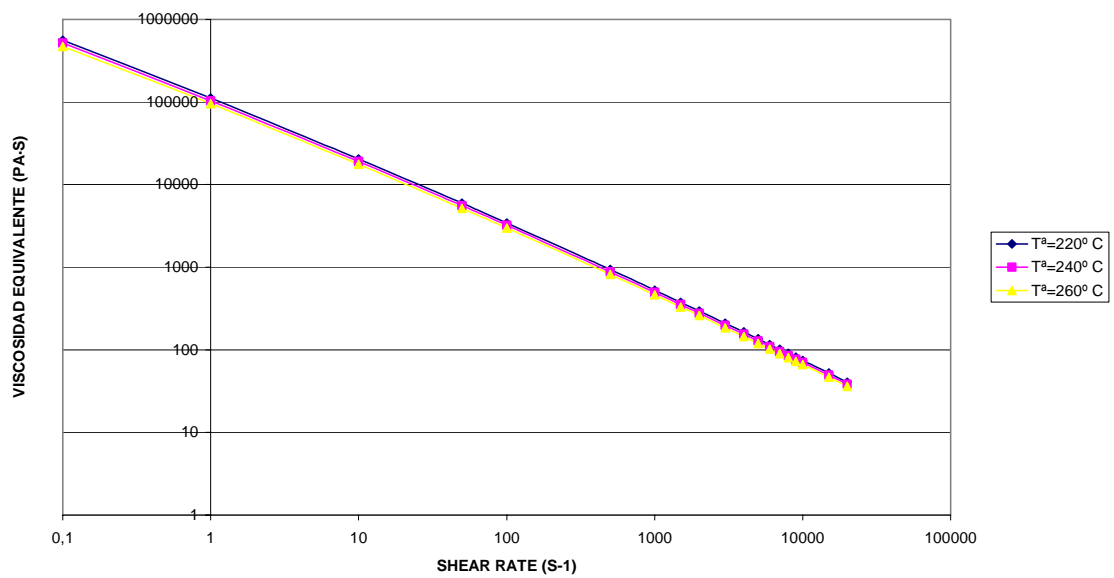
MATERIAL 60% RECICLADO



MATERIAL 80% RECICLADO



MATERIAL 100% RECICLADO



Si se compara la forma de las gráficas obtenidas con las disponibles en bases de datos se observa una diferencia en la forma para bajos valores de shear rate.

Para bajos valores shear rate, el polietileno deja de comportarse como un fluido no Newtoniano y pasa a comportarse como un fluido Newtoniano, es decir, la viscosidad alcanza un valor constante que es independiente de la velocidad de cizalla.

El valor constante al que tiende la viscosidad se determina con las constantes del material del modelo viscoso de segundo orden.

Mediante la siguiente ecuación se calcula el valor de shear rate a partir del cual la viscosidad pasa a tener un valor constante:

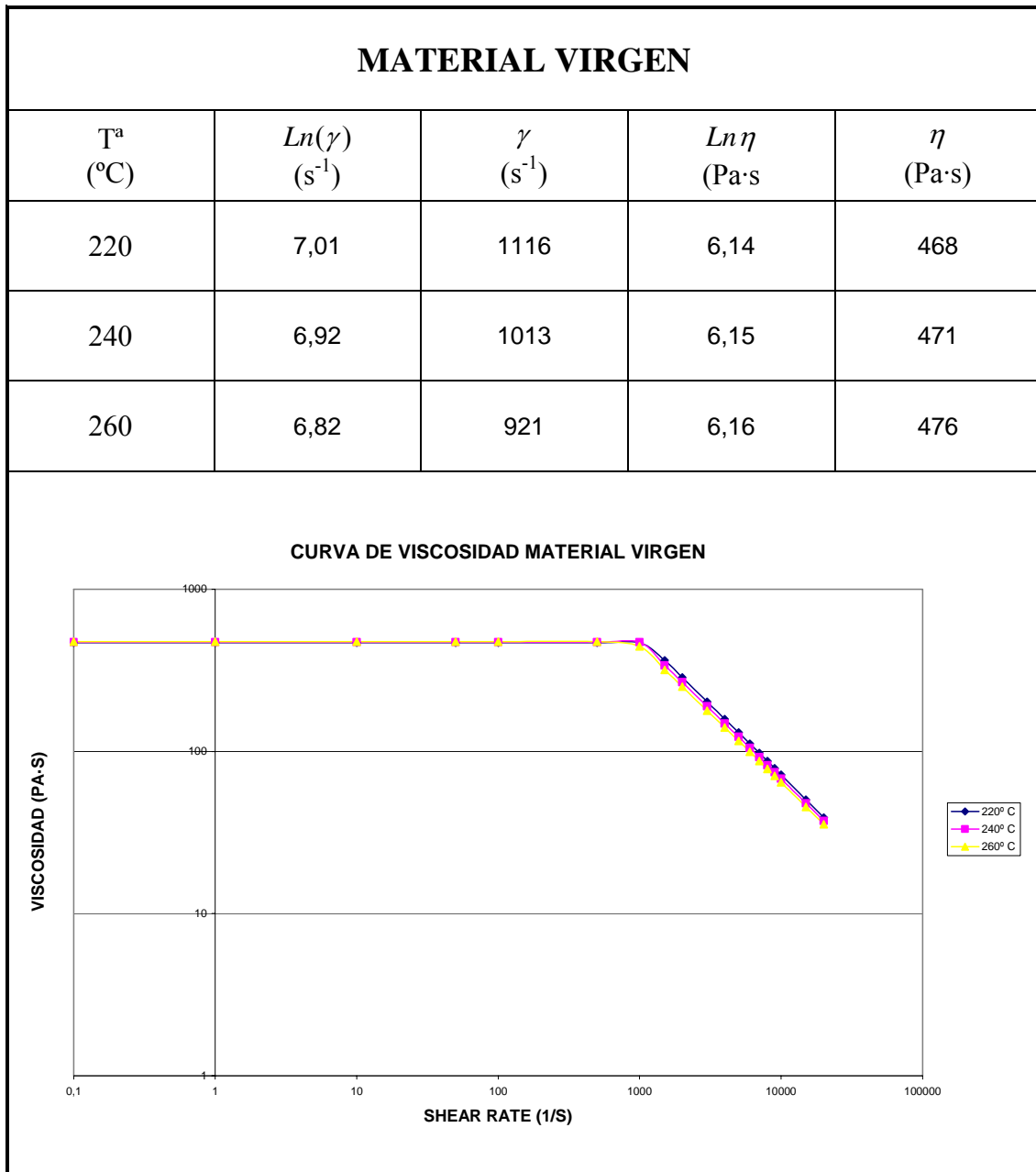
$$\ln(\gamma) = \frac{A_0 + A_2 \cdot T}{2 \cdot A_1}$$

Donde:

- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- A_0 , A_1 y A_2 , son las constantes del material. Adimensionales.
- T es la temperatura en $^{\circ}C$.

El valor de shear rate obtenido se sustituye en la ecuación del modelo viscoso equivalente de segundo orden previamente calculado.

Se determina el valor de viscosidad equivalente constante que tiene el material a partir del shear rate límite calculado con la ecuación anterior.



5.1.2.4.- Aplicación a los programas de simulación.

El objetivo de este trabajo es obtener modelos viscosos para poder introducirlos en la base de datos de programas de simulación de inyección.

Vamos a realizar simulaciones de inyección con los modelos viscosos de los materiales analizados a varios moldes de tamaños diferentes.

Este punto de nuestro trabajo también nos sirve para comprobar que el método desarrollado para el cálculo de modelos viscosos es correcto. Si realizamos una simulación del molde espiral con los modelos viscosos calculados, y comparamos los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos en los ensayos experimentales, podremos comprobar si las suposiciones y los cálculos realizados son correctos.

Por este motivo principalmente, el primer modelo geométrico sobre el que vamos a realizar las simulaciones de inyección va a ser el del molde espiral.

SIMULACIÓN DEL MOLDE ESPIRAL.

Realizando la simulación del molde espiral con los parámetros de proceso que hemos utilizado en las pruebas experimentales, y comparando los resultados con los obtenidos en las pruebas experimentales, se puede comprobar que el método de trabajo es correcto si se cierra el círculo de cálculos.

Si los resultados obtenidos son fiables, podremos aplicar estos modelos viscosos a otros moldes sabiendo que los resultados obtenidos en el programa de simulación van a ser similares a los que se obtendrían si se realizasen pruebas experimentales.

Se simula la inyección del molde espiral bajo las mismas condiciones en las que hemos realizado las pruebas experimentales.

De cada caso simulado se obtiene al igual que en las pruebas experimentales, la evolución de la presión de inyección en los dos puntos donde están situados los sensores de presión en el molde, y el tiempo que tarda el plástico en recorrer la distancia que separa los dos puntos.

Como se ha explicado en apartados anteriores, lo que se simula no es la inyección de una pieza sino la inyección del molde en el que interfiere no solo la geometría de la pieza sino también el sistema de alimentación y refrigeración.

Se localizan en la malla de la espiral los nodos que se corresponden con la posición de los sensores de presión.

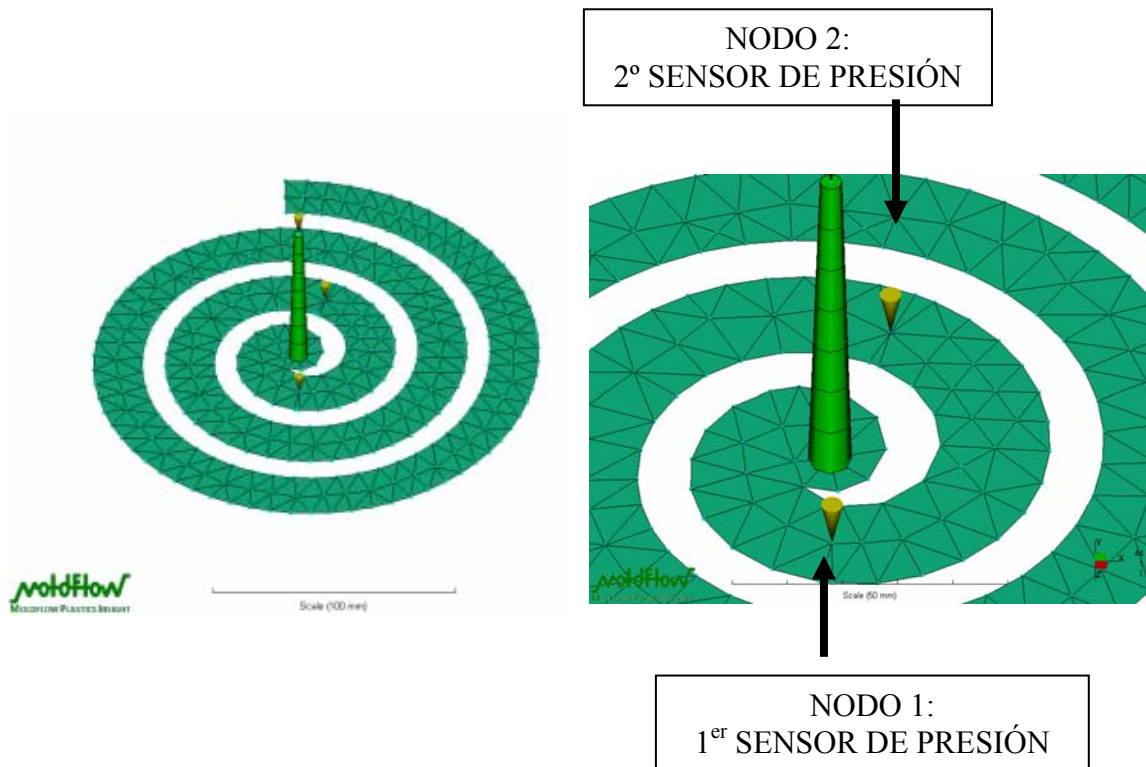


Fig. Geometría, punto de inyección de la pieza y colocación de los sensores de presión.

En primer lugar nos interesa comprobar la fiabilidad del método de cálculo desarrollado por lo que solo se recogen los resultados de simulación que son útiles para la comparación con los ensayos experimentales, que son en los nodos que se indican en las imágenes anteriores.

Los distintos casos de simulación de inyección que se han realizado con los modelos viscosos calculados, se realizan en las siguientes condiciones de proceso:

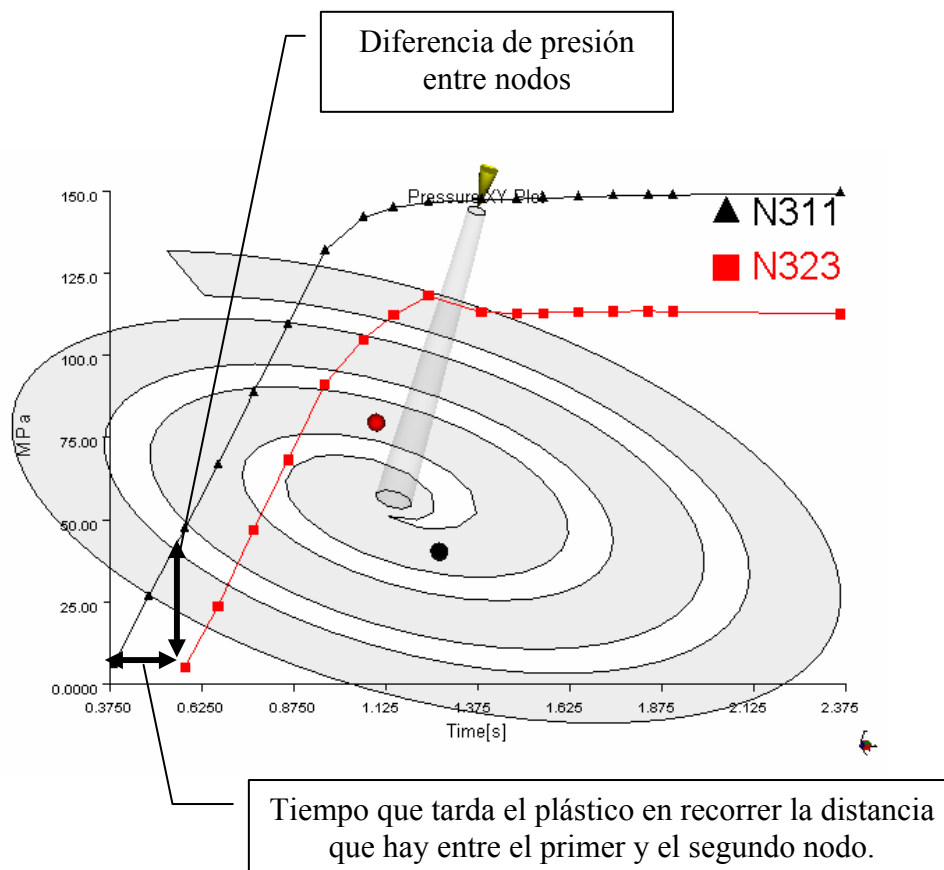
CONDICIONES DEL PROCESO	
MATERIALES	SABIC HDPE M40060S Con 20, 40, 60, 80 y 100% del mismo material reciclado
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
T ° DE INYECCIÓN	220, 240 y 260° C
T ° DE REFRIGERACIÓN	40 °C
PRESIÓN DE CORTE	80 MPa
CAUDAL DE INYECCIÓN	Se ajusta para cada caso simulado con el objeto de introducir el mismo caudal que se obtiene como resultado en las pruebas de inyección.

Resultados de simulación

De la misma manera que en las pruebas experimentales, al analizar los resultados de simulación obtenemos una gráfica que nos muestra la evolución de la presión en el interior del molde en los dos nodos que queremos analizar.

De esta gráfica se obtienen dos resultados;

- La diferencia de presión entre los dos nodos analizados, en el momento en el que el plástico alcanza el nodo más lejano.
- El tiempo que tarda el plástico en las condiciones de inyección la distancia entre los dos nodos analizados.



Los resultados obtenidos de la simulación de la inyección del molde espiral con los modelos viscosos calculados se presentan a continuación:

5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

MATERIAL VIRGEN			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,19	42,0
	30	0,13	43,9
	40	0,10	52,9
	55	0,07	55,1
	70	0,06	56,0
240	20	0,19	40,9
	30	0,13	42,6
	40	0,10	43,2
	55	0,07	46,8
	70	0,06	49,5
260	20	0,19	40,8
	30	0,13	41,4
	40	0,10	41,2
	55	0,08	43,3
	70	0,06	44,9

MATERIAL 20% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,19	56,9
	30	0,14	58,7
	40	0,13	58,9
	55	0,07	59,6
	70	0,06	60,1
240	20	0,19	53,3
	30	0,13	55,3
	40	0,10	58,1
	55	0,07	57,9
	70	0,06	57,6
260	20	0,19	49,3
	30	0,13	52,7
	40	0,10	54,7
	55	0,07	55,6
	70	0,06	55,5

MATERIAL 40% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,19	41,9
	30	0,13	42,3
	40	0,10	45,9
	55	0,07	47,6
	70	0,06	48,5
240	20	0,19	40,0
	30	0,13	41,1
	40	0,10	42,9
	55	0,07	44,5
	70	0,06	45,5
260	20	0,12	40,1
	30	0,13	39,4
	40	0,10	41,4
	55	0,08	42,8
	70	0,06	43,3

MATERIAL 60% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,20	42,4
	30	0,13	43,4
	40	0,10	52,9
	55	0,07	55,1
	70	0,05	56,0
240	20	0,16	41,8
	30	0,10	44,1
	40	0,07	48,7
	55	0,06	49,6
	70	0,05	50,8
260	20	0,19	40,7
	30	0,13	39,5
	40	0,10	42,9
	55	0,07	45,3
	70	0,06	46,2

MATERIAL 80% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,17	44,0
	30	0,12	45,4
	40	0,09	52,9
	55	0,07	55,1
	70	0,05	56,0
240	20	0,16	43,6
	30	0,12	43,3
	40	0,10	45,1
	55	0,07	47,8
	70	0,06	50,7
260	20	0,16	41,8
	30	0,13	41,2
	40	0,10	42,4
	55	0,07	45,8
	70	0,06	47,9

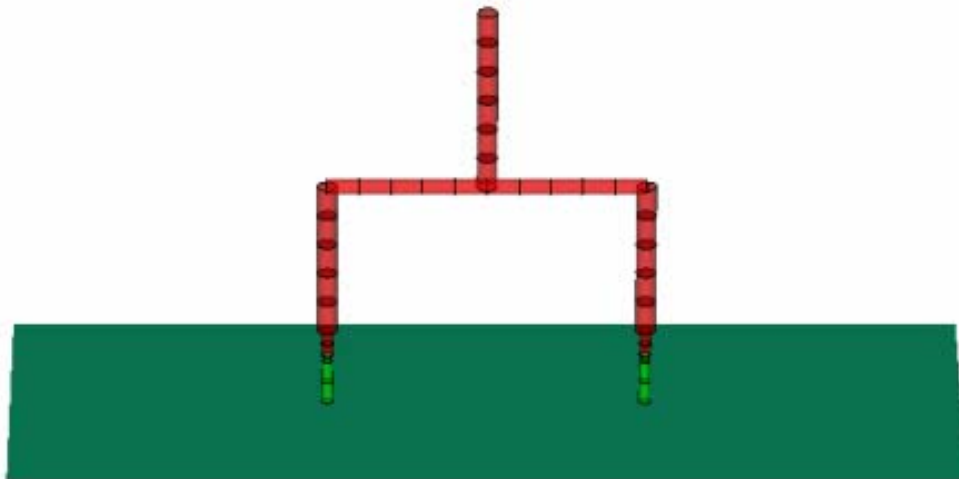
MATERIAL 100% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	20	0,19	42,9
	30	0,13	44,3
	40	0,09	52,9
	55	0,07	55,1
	70	0,06	56,0
240	20	0,18	42,0
	30	0,13	41,5
	40	0,10	44,9
	55	0,07	46,4
	70	0,06	47,8
260	20	0,19	40,5
	30	0,13	39,8
	40	0,09	42,2
	55	0,07	43,8
	70	0,06	45,5

SIMULACIÓN DEL MOLDE PLACA.

El siguiente molde que se simula con los distintos modelos viscosos calculados con el molde espiral, es un molde con el que también se van a realizar ensayos experimentales.

Este molde es un molde sencillo, su geometría es una placa plana alimentada en dos puntos por una cámara caliente y que también está provisto de sensores de presión.

Los ensayos experimentales realizados nos van a permitir, igual que el molde espiral, comparar los resultados que se obtienen de la simulación con los obtenidos en las pruebas experimentales, comprobando así que el método de cálculo desarrollado es correcto.



5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

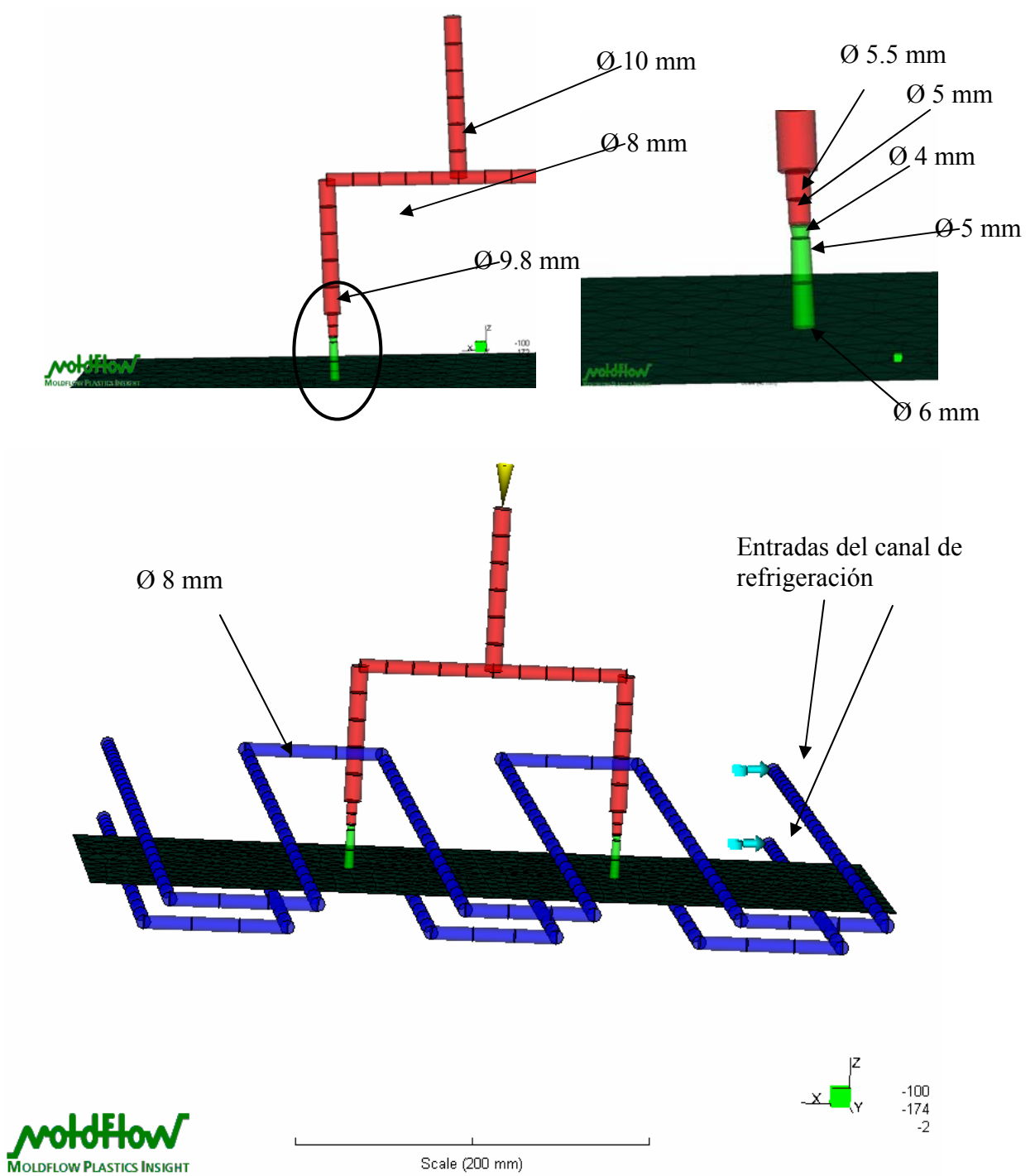


Fig. Imágenes la geometría del molde realizada que se va a simular

El trabajo de simulación se realizó posteriormente a la realización de las pruebas experimentales. Esto implica que, deben ser utilizados en las distintas simulaciones, los mismos parámetros de proceso que se emplearon en las pruebas experimentales. De esta manera, todos los resultados que se obtengan de la simulación podrán ser comparados con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales.

Los parámetros de proceso utilizados tanto en los ensayos experimentales como en las simulaciones de inyección son los mismos en todos los casos, solo varía el porcentaje de material reciclado, y son los siguientes:

CONDICIONES DEL PROCESO	
MATERIALES	SABIC HDPE M40060S Con 20, 40, 60, 80 y 100% del mismo material reciclado
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
T ° DE INYECCIÓN	220, 240 y 260° C
T ° DE REFRIGERACIÓN	40 °C
CAUDAL DE INYECCIÓN	Se ajusta para cada caso simulado con el objeto de introducir el mismo caudal que se obtiene como resultado en las pruebas de inyección.
CAMBIO DE FASE	99% del volumen de llenado
PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	20 Bar

En la inyección y simulación de este molde el proceso de inyección ya se realiza con todas sus fases de proceso, es decir, se introduce la fase de compactación.

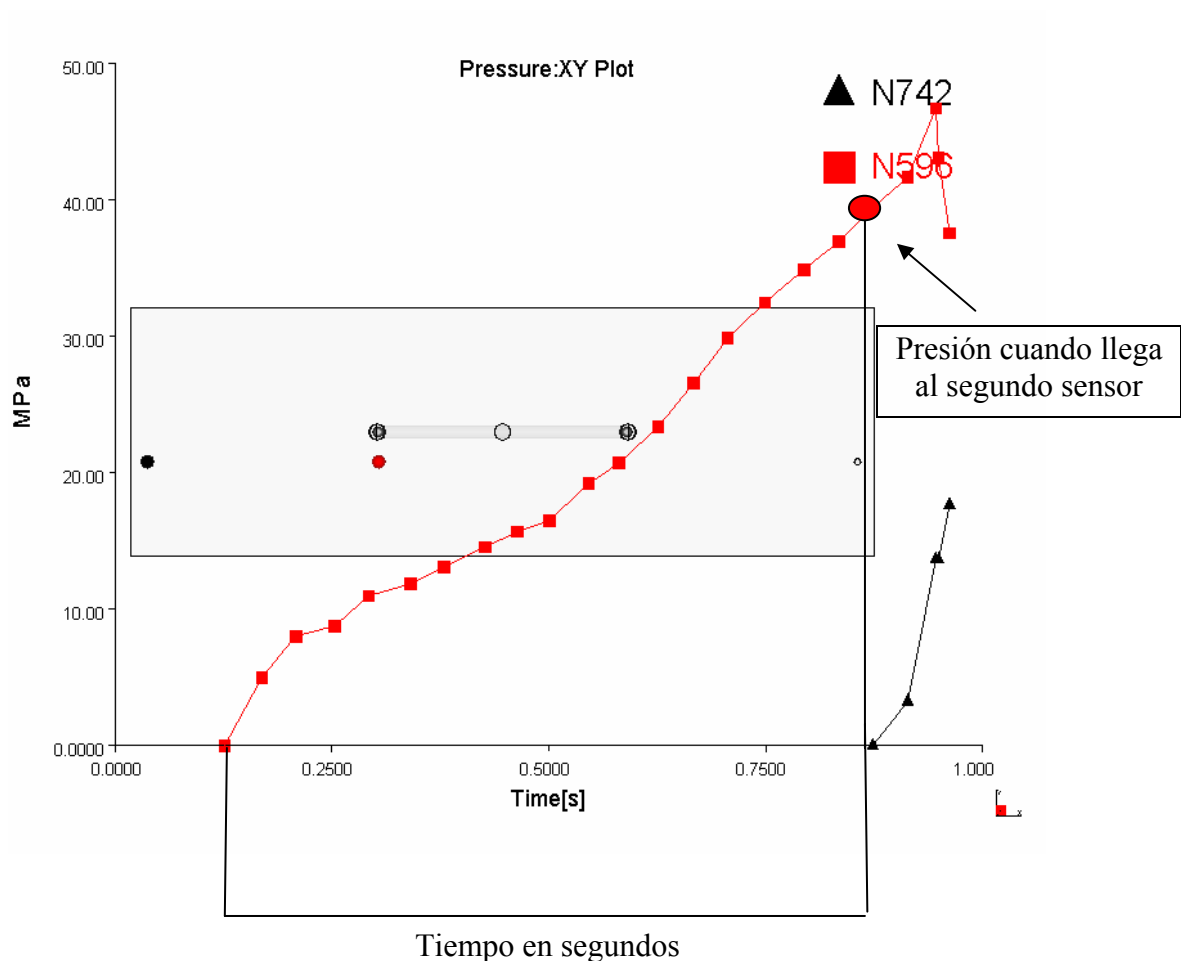
Aunque no vamos a obtener ningún resultado de la fase de compactación, ni va a influir en los resultados que se obtengan de la fase de llenado, realizamos el ciclo de inyección completo ya que se trata de un molde convencional industrial, y es necesario realizar el ciclo completo para poder expulsar la pieza del molde sin ningún problema.

Por otra parte nos interesa que las piezas inyectadas sean de una calidad óptima porque van a ser utilizadas para realizar ensayos de caracterización mecánica con los materiales inyectados con distintos porcentajes de material reciclado.

Resultados de simulación

Como en el caso del molde espiral, solo vamos a centrarnos en los resultados que nos ofrece la fase de llenado que es la que nos aporta los resultados que se ven mas afectados por la diferencia de viscosidad de los materiales y además son comparables con los resultados que se obtienen de las pruebas experimentales realizadas.

El molde está dotado de sensores de presión, por lo que se recogen los valores de presión en el interior del molde en los puntos donde están situados los sensores de presión en el molde, y el tiempo transcurrido desde que el primer sensor recibe la primera señal de presión hasta que la recibe el segundo sensor.



5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

Los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones de inyección del molde con los modelos viscosos calculados previamente se presentan a continuación:

MATERIAL VIRGEN			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,64	28,9
	80	0,4	29,7
	120	0,28	31,2
240	40	0,65	27,6
	80	0,4	28,9
	120	0,28	30,6
260	40	0,66	26,9
	80	0,41	27,5
	120	0,29	28,2

MATERIAL 40% RECICLADO			
T ^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,72	34,6
	80	0,44	32,4
	120	0,39	31,8
240	40	0,73	33,3
	80	0,41	30,9
	120	0,36	30,6
260	40	0,67	32,5
	80	0,41	29,8
	120	0,35	28,5

MATERIAL 60% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,71	35,7
	80	0,45	33,5
	120	0,39	32,4
240	40	0,71	34,3
	80	0,43	32,1
	120	0,38	31,6
260	40	0,74	33,9
	80	0,42	31,3
	120	0,35	29,9

MATERIAL 100% RECICLADO			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	t (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,74	39,4
	80	0,45	35,8
	120	0,39	34,6
240	40	0,74	37,9
	80	0,43	34,3
	120	0,36	33,2
260	40	0,67	35,9
	80	0,40	33,5
	120	0,33	31,1

SIMULACIÓN DE UN MOLDE DE CONTENUR.

El desarrollo de este método de cálculo de variación de viscosidades tiene como objetivo final el aplicarlo a piezas reales de producción.

En este caso se va a simular con los distintos modelos viscosos calculados, un molde de CONTENUR, que actualmente se utiliza para la producción de cubos de 340L.

Los resultados obtenidos de la simulación solo pueden compararse con los resultados y parámetros de proceso que se utilizan en las máquinas de inyección para la producción industrial de este molde.

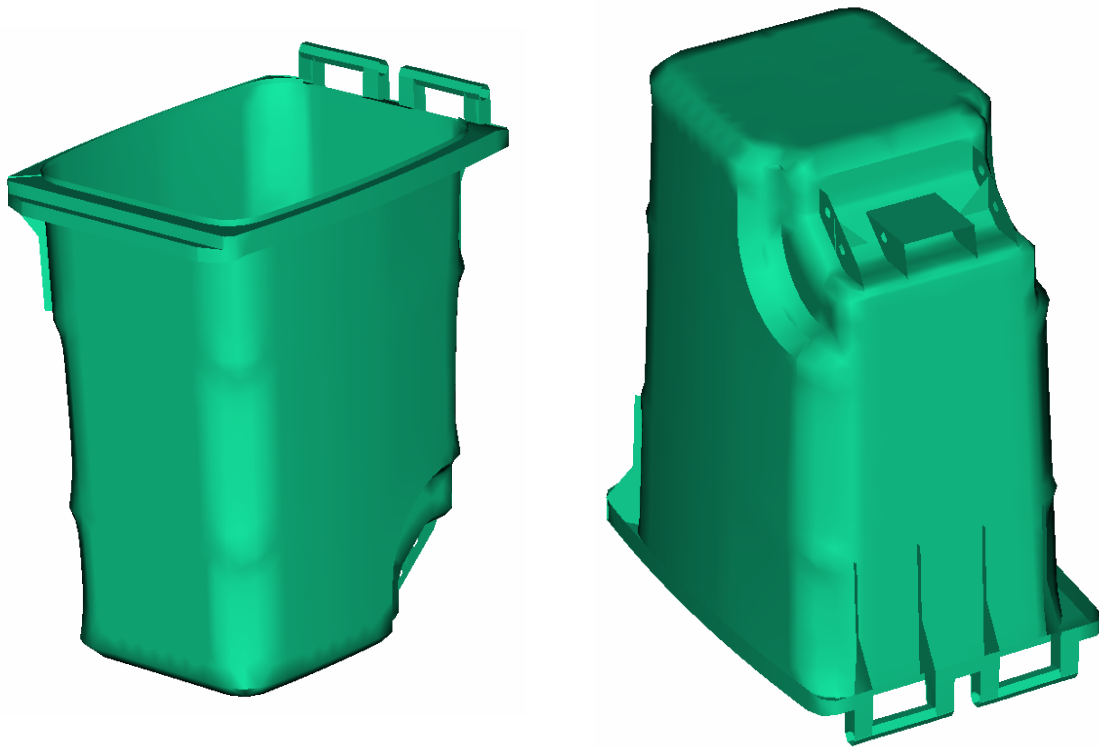


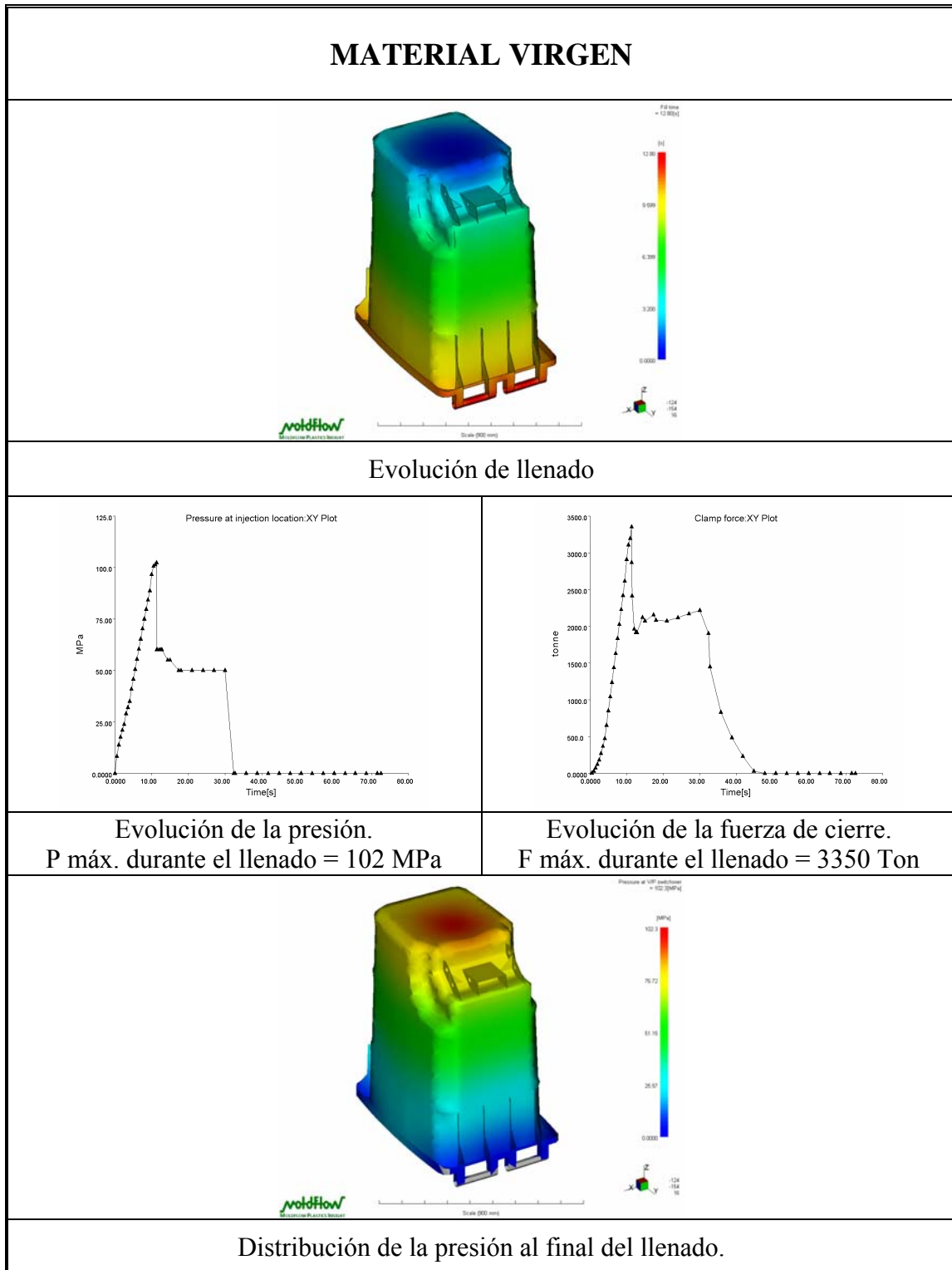
Fig. Geometría de la pieza

Como en los casos simulados anteriormente, los parámetros de proceso son comunes para todos los casos simulados, solo se varía el modelo viscoso de los materiales calculados.

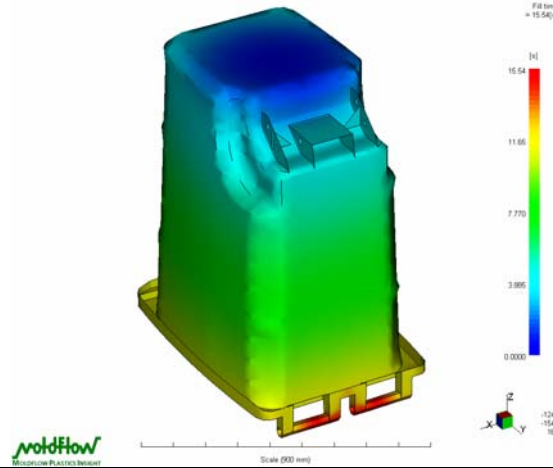
CONDICIONES DEL PROCESO													
MATERIALES	SABIC HDPE M40060S Con 20, 40, 60, 80 y 100% del mismo material reciclado												
Tª DE INYECCIÓN	240° C												
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua												
Tª DE REFRIGERACIÓN	40 °C												
TIEMPO DE INYECCIÓN	10 s												
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	<table border="1"> <caption>Data for % Maximum flow rate [%] vs % Shot volume [%]</caption> <thead> <tr> <th>% Shot volume [%]</th> <th>% Maximum flow rate [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0000</td><td>35.00</td></tr> <tr><td>10.00</td><td>55.00</td></tr> <tr><td>20.00</td><td>75.00</td></tr> <tr><td>80.00</td><td>90.00</td></tr> <tr><td>100.00</td><td>65.00</td></tr> </tbody> </table>	% Shot volume [%]	% Maximum flow rate [%]	0.0000	35.00	10.00	55.00	20.00	75.00	80.00	90.00	100.00	65.00
% Shot volume [%]	% Maximum flow rate [%]												
0.0000	35.00												
10.00	55.00												
20.00	75.00												
80.00	90.00												
100.00	65.00												
CAMBIO DE FASE	97% del volumen de llenado												
TIEMPO DE COMPACTACIÓN	20 s.												
PROGRAMACIÓN DE PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	<table border="1"> <caption>Data for Packing pressure [MPa] vs Duration [s]</caption> <thead> <tr> <th>Duration [s]</th> <th>Packing pressure [MPa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0000</td><td>50.00</td></tr> <tr><td>2.50</td><td>60.00</td></tr> <tr><td>4.50</td><td>55.00</td></tr> <tr><td>20.00</td><td>50.00</td></tr> </tbody> </table>	Duration [s]	Packing pressure [MPa]	0.0000	50.00	2.50	60.00	4.50	55.00	20.00	50.00		
Duration [s]	Packing pressure [MPa]												
0.0000	50.00												
2.50	60.00												
4.50	55.00												
20.00	50.00												

Resultados de simulación

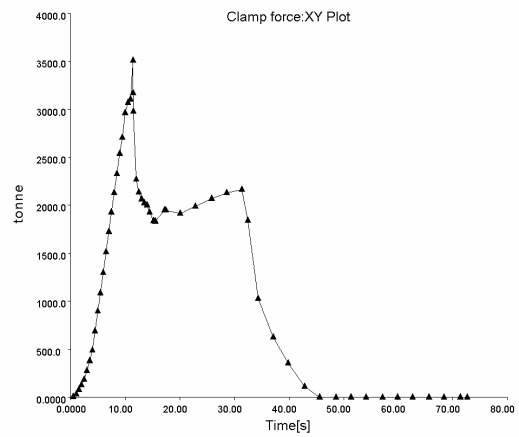
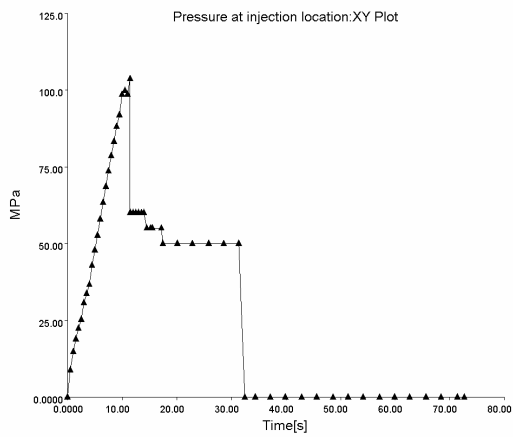
Se simula la inyección de la geometría del cubo de 340L y se recogen los resultados de presión, fuerza de cierre y evolución del llenado.



MATERIAL 20% RECICLADO

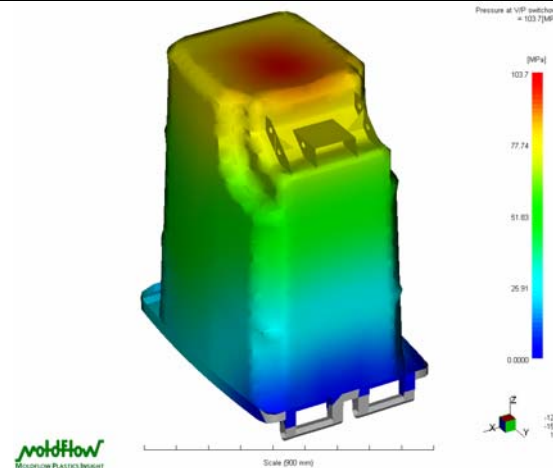


Evolución de llenado



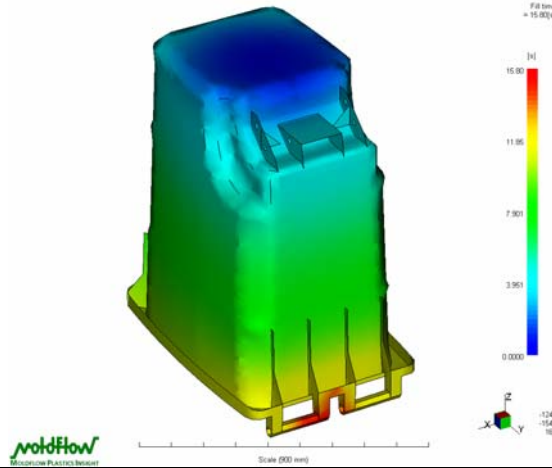
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 104 MPa

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3500 Ton

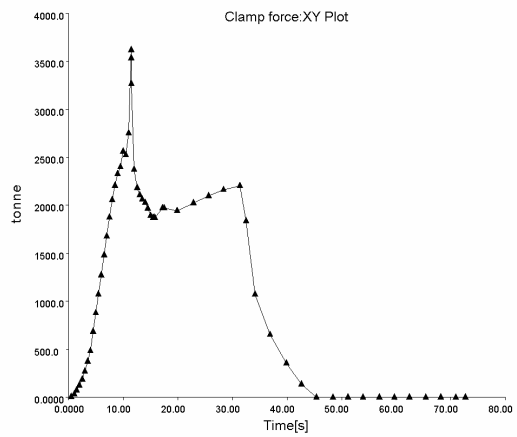
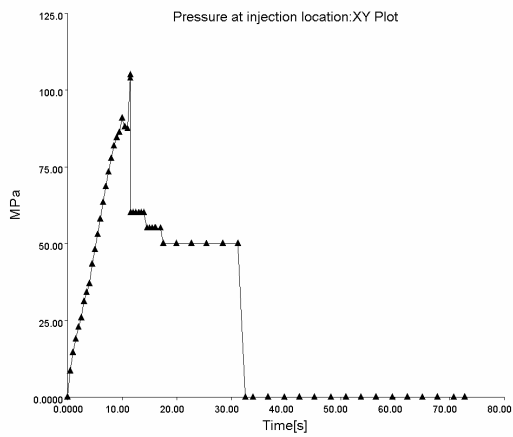


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL 40% RECICLADO

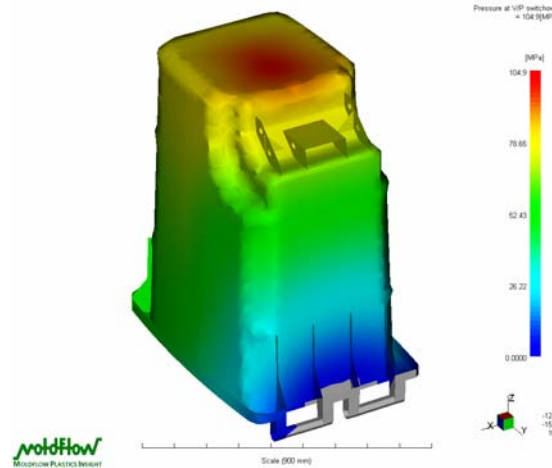


Evolución de llenado



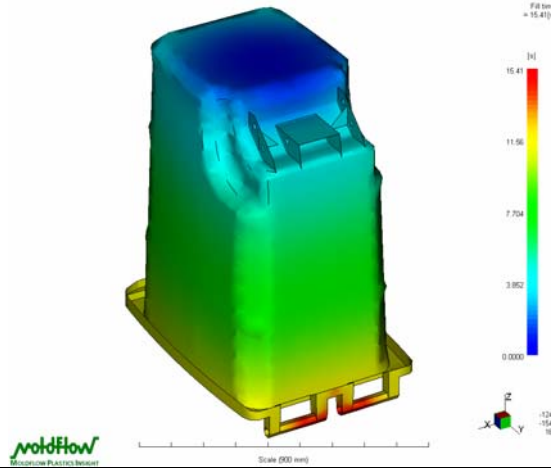
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 105 MPa

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3620 Ton

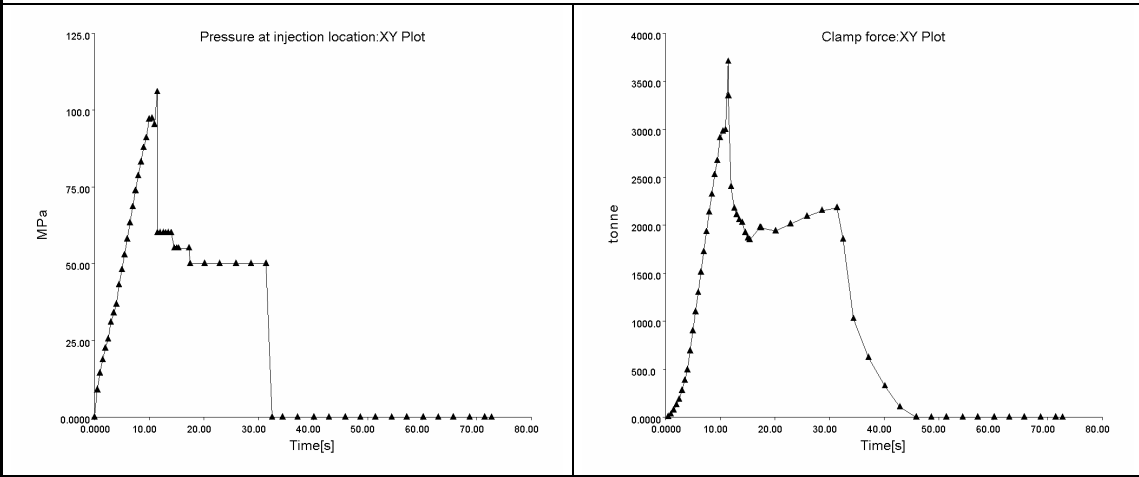


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL 60% RECICLADO

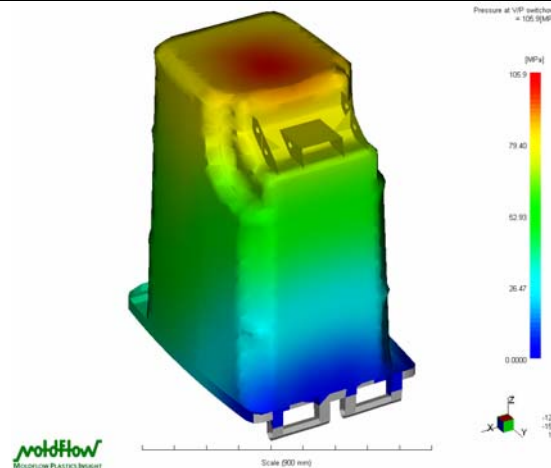


Evolución de llenado



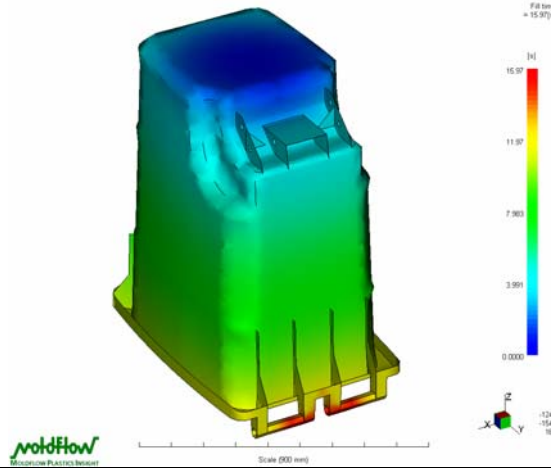
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 106 MPa

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3750 Ton

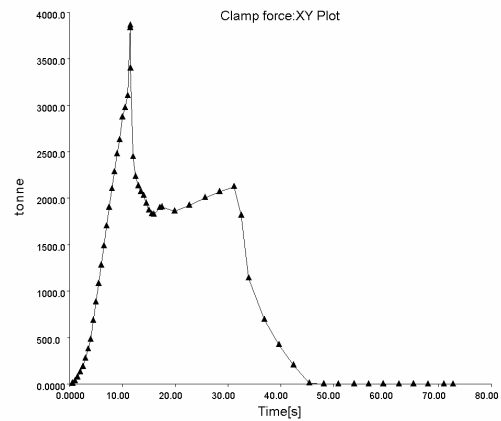
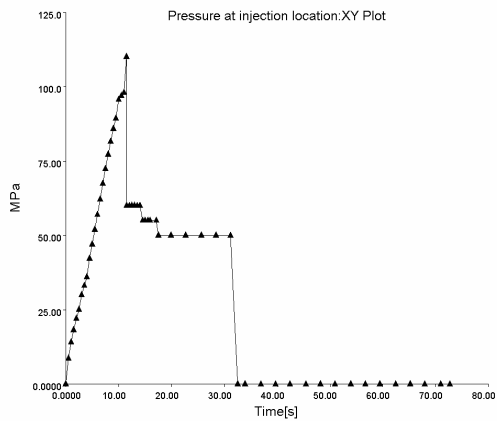


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL 80% RECICLADO

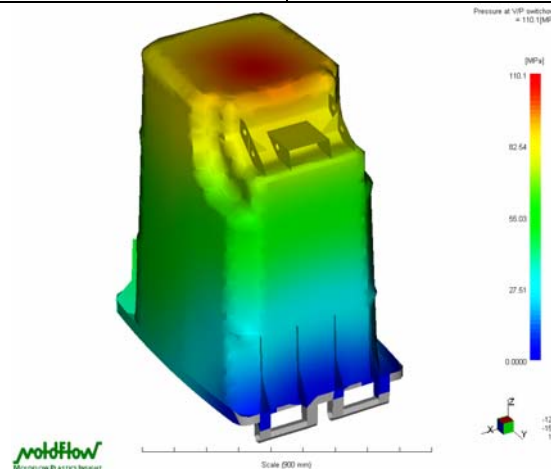


Evolución de llenado



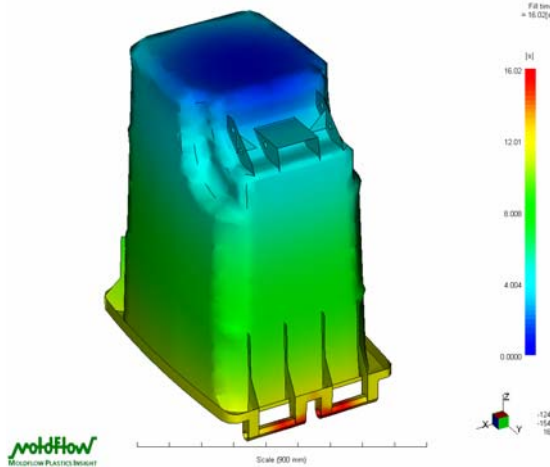
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 110 MPa

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3860 Ton

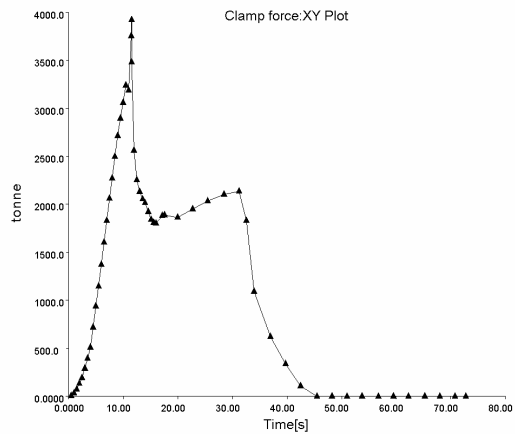
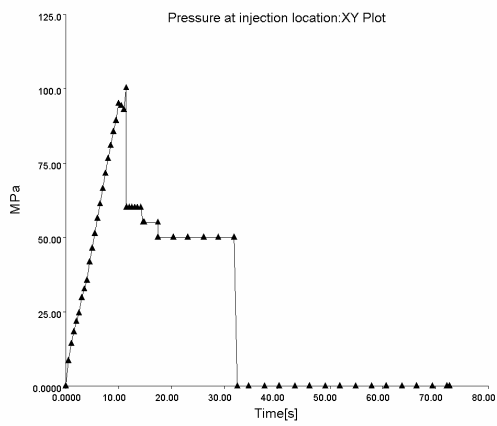


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL 100% RECICLADO

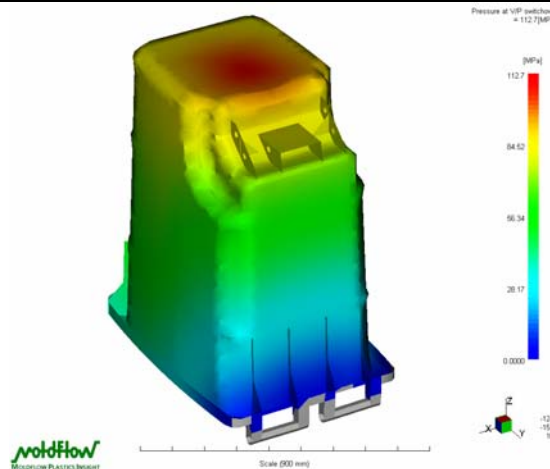


Evolución de llenado



Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 113 MPa.

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3920 Ton



Distribución de la presión al final del llenado.

Los resultados numéricos obtenidos de todos los casos simulados se recogen en la siguiente tabla:

RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
% Reciclado	Tiempo de llenado (s)	Presión máx. (MPa)	Fuerza de cierre máx. (Ton)
0	12.8	102	3350
20	15.5	104	3500
40	15.8	105	3620
60	15.4	106	3700
80	16	110	3860
100	16	113	3920

5.1.2.5.- Pruebas experimentales con los materiales analizados.

Con los mismos tipos de materiales que se han utilizado para el cálculo de modelos viscosos se realizan inyecciones en moldes de producción para comprobar que los resultados obtenidos utilizando los modelos viscosos en simulación se asemejan a las pruebas de inyección reales. Esto nos ayuda a corroborar que el método desarrollado es fiable para el fin que se ha desarrollado.

MOLDE PLACA.

El molde placa utilizado es el diseñado por D. Jorge Aísa para su tesis doctoral.

Este molde produce placas rectangulares cuyas dimensiones son: 450mm de largo por 150mm de ancho y 2,8mm de espeso.



Fig. Imagen de la pieza inyectada

Las dimensiones de esta placa permiten obtener probetas de tipo halterio, a partir del mecanizado de las piezas inyectadas obtenidas, según la norma ASTM D 638M-93, [AST 93] recogidas también por la norma española UNE-EN ISO 527 [ISO 97].

Mediante el análisis de las probetas inyectadas se pueden obtener valores experimentales en puntos críticos de piezas inyectadas como; líneas de soldadura, en puntos característicos de un sistema de inyección, tanto convencional como secuencial, y para trabajos posteriores de análisis mecánicos.

Como sucede en este caso, las probetas que se obtienen de la inyección de estas placas van a ser utilizadas para realizar el análisis de impacto.

La alimentación al molde se produce a través de una cámara caliente MoldMasters que está colocada centrada con la cavidad de la pieza. Tiene dos boquillas calientes con cierre y apertura hidráulico, que permiten el llenado de la pieza de forma secuencial.

Los puntos de entrada están centrados en la pieza y separados 150mm. Su colocación proporciona un llenado de la pieza equilibrado.

La entrada a pieza es directa, mediante dos coladas frías que tienen las siguientes dimensiones:

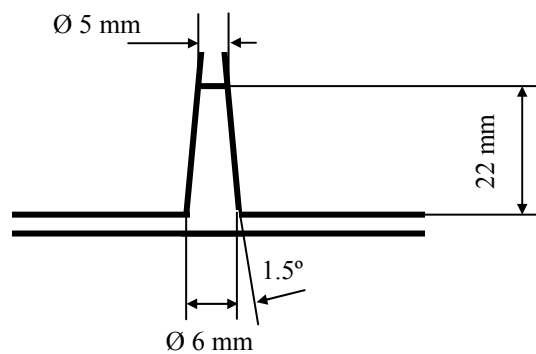


Fig. Esquema dimensional de las entradas frías a pieza.

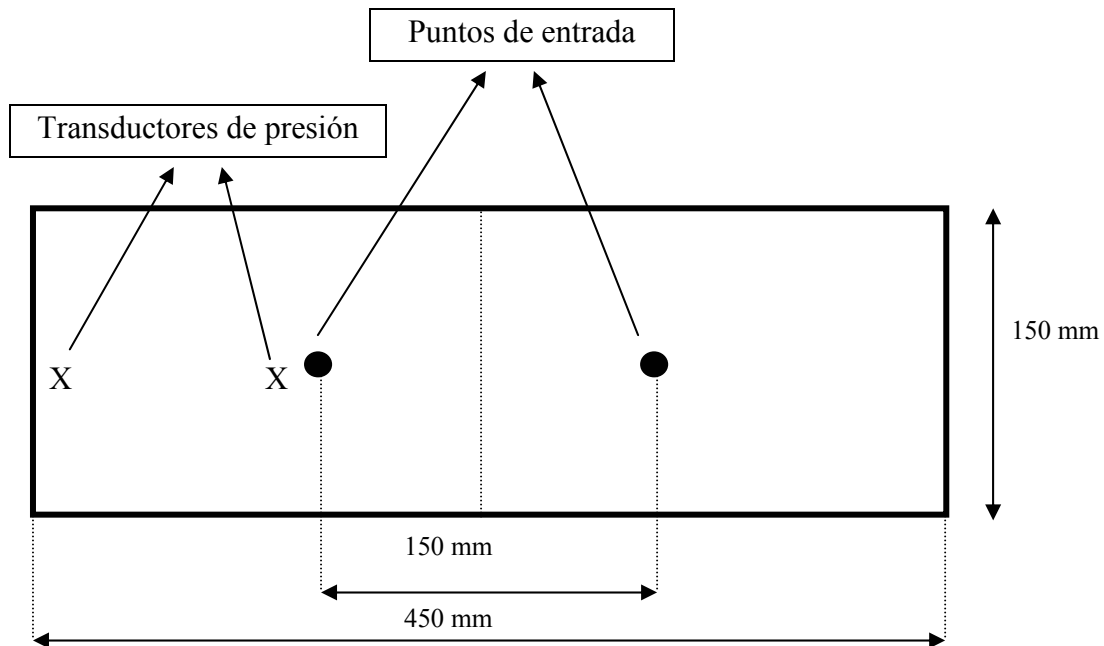
El molde está dotado con dos transductores de presión, colocados en dos puntos de interés de la pieza.

Uno de ellos se encuentra próximo a uno de los puntos de entrada a la pieza. Aporta información a cerca de cómo se realiza el proceso, de la cantidad de presión que llega realmente a la cavidad de la ejercida por la máquina de inyección en cada una de las fases del proceso de inyección.

El otro transductor se encuentra colocado en el extremo final de la pieza, donde se produce el final del llenado. Este sensor aporta información a cerca de la caída real de presión que se produce en el interior de la pieza, de la efectividad en la transmisión de presión en el interior del molde.

Ambos sensores son de medida directa, ofrecen el valor de presión que recogen al entrar en contacto con el plástico fundido. Son iguales a los descritos y utilizados en los ensayos con el molde espiral.

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones y características principales descritas de la pieza.



El sistema de refrigeración se compone de unos circuitos de sección circular y de 8mm de diámetro que recorren la figura de la pieza por las dos partes del molde para conseguir un enfriamiento lo mas uniforme posible, evitando o disminuyendo las contracciones de la pieza.

La distribución de los canales en las placas del molde se ilustra en las siguientes imágenes:

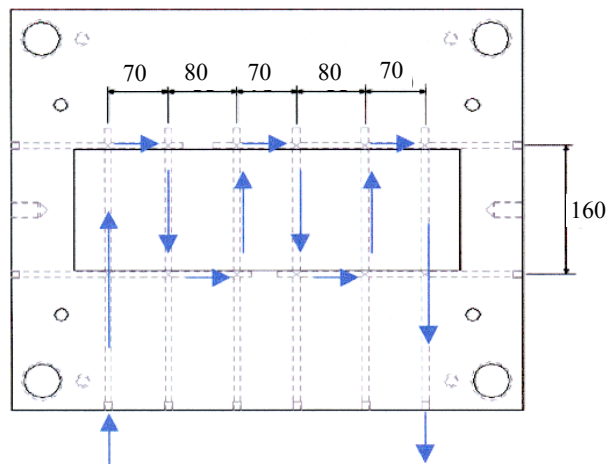


Fig. Distribución de los canales en lado móvil del molde.

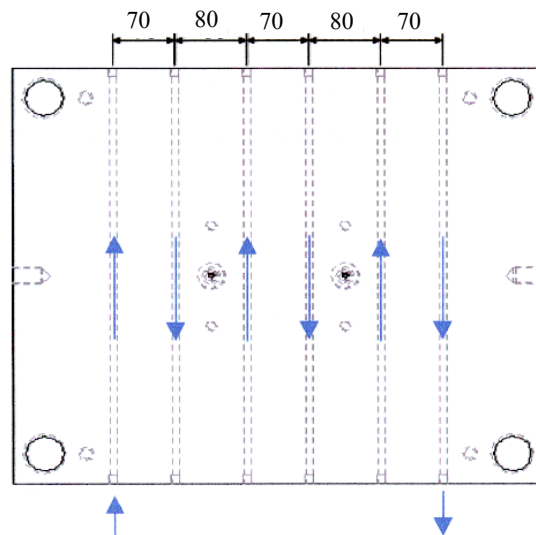


Fig. Distribución de los canales en el lado fijo del molde.

Debido a la cámara caliente no se pueden hacer taladros transversales para conectar los circuitos de refrigeración por lo que se conectan por el exterior del molde mediante mangueras.

La expulsión de la pieza del molde se realiza mediante 6 expulsores, de 6mm de diámetro distribuidos uniformemente por la superficie de la pieza

Para la realización de las pruebas de inyección se requiere una máquina de mayor tamaño que la utilizada para la inyección del molde espiral, no solo por el tamaño del molde sino también por la fuerza de cierre requerida para la inyección del molde

La máquina de inyección utilizada para las pruebas experimentales es una Billion 750 LFG-T ubicada en Fundación AITIP, en el Parque Tecnológico de Cogullada.



Los parámetros de proceso y los movimientos de la máquina se controlan a través del monitor.

En la siguiente tabla se recogen las características principales de la máquina utilizada.

BILLION 750 LFG-T

CIERRE	Fuerza de cierre		TN	750
	Espesor de molde	Mínimo	mm	450
		Máximo	mm	1200
	Carrera máxima de apertura		mm	1200
	Tamaño de los platos Hp x Vp		mm	1570x1570
	Paso entre columnas H x V		mm	1100x1100
	Sistema de cierre			Hidráulico
	Numero de noyos			2

INYECCIÓN	Diámetro del husillo		mm	105
	Presión máxima de inyección		Bar	1508
	Volumen teórico de inyección		cm ³	4545
	Caudal de inyección teórico		cm ³ /s	2164
	Capacidad de plastificación		cm ³ /s	120
	Tipo de boquilla			Abierta

PERIFÉRICOS Y OTROS	Control de inyección con gas, equipos disponibles para 4 vías.		
	Inyección secuencial		
	Inyección – Compresión		
	Inyección asistida con agua		
	Inyección bimatéria		

La cadena de medida utilizada para la obtención de las medidas realizadas por los sensores de presión durante la realización de las pruebas de inyección es la misma que la utilizada para los ensayos de inyección realizados con el molde espiral.

Los ensayos experimentales de inyección se realizan utilizando siempre los mismos parámetros de proceso, de manera que todas las pruebas realizadas sean comparables entre si:

Los parámetros de proceso bajo los que se han realizado las pruebas de inyección se presentan a continuación:

Material

Las pruebas de inyección se realizan con: material virgen, material con un 40% de reciclado, material con un 60% de reciclado y material con un 100% de reciclado.

Se consideran suficientes muestras para analizar la influencia del porcentaje de reciclado en los parámetros de proceso y para posteriormente realizar ensayos mecánicos de tracción e impacto.

Los porcentajes de material reciclado a mezclar se calculan de forma gravimétrica, de la misma manera que para las pruebas experimentales con el molde espiral, por peso. Las proporciones de material se calculan en base a 10Kg de material, que es la cantidad que se estima necesaria de cada tipo de material para realizar todas las pruebas de inyección previstas.

Porcentaje (%)	PEHD virgen (Kg.)	PEHD reciclado (Kg.)	TOTAL (Kg.)
0	10	0	10
40	6	4	10
60	4	6	10
100	0	10	10

Temperatura del material

Los valores de temperatura utilizados se encuentran dentro del rango de valores de temperatura recomendados por fabricante para su uso industrial, entre 180 y 280°C.

Las diferentes temperaturas a las que se realizan los ensayos son: 220, 240 y 260° C.

Velocidad de inyección

La determinación de las velocidades de inyección depende de la geometría del molde y de las características de la máquina de inyección. Las velocidades elegidas para realizar las pruebas deben ser tales que bajo cualquiera del resto de condiciones impuestas la pieza se llene por completo.

Las velocidades de avance de husillo utilizadas en las pruebas de inyección son: 40, 80 y 120 mm/s

El resto de parámetros de proceso se mantienen inalterables durante todos los ensayos experimentales y son los siguientes.

<u>PARÁMETROS DE PROCESO</u>	
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
CAMBIO DE FASE	99% del volumen de llenado
PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	20 Bar

Para comprobar la reproductibilidad de la máquina y así asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos se realizan 5 inyecciones para cada condición de inyección impuesta.

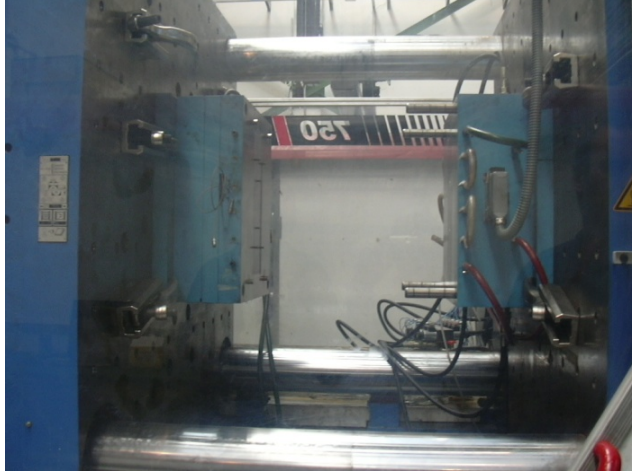


Fig. Imagen del molde abierto dentro de la máquina de inyección

Las piezas que se obtienen de cada inyección se marcan para que al obtener luego las probetas para los ensayos mecánicos se conozcan las condiciones de proceso bajo las que ha sido inyectada.

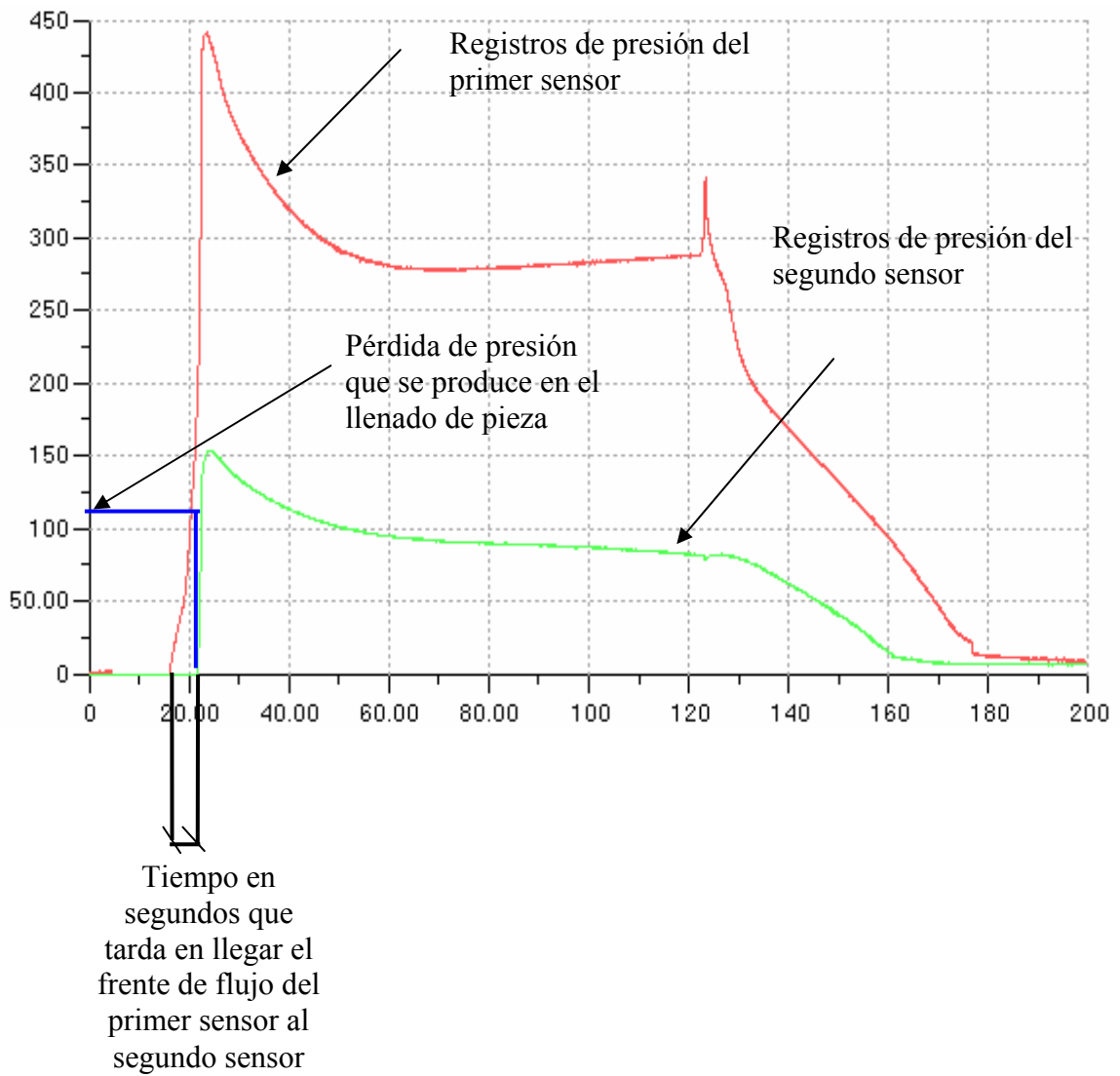
De cada una de las inyecciones realizadas se obtiene una gráfica de presión en la que se observa la evolución de la presión en cada uno de los puntos de la pieza donde están situados los sensores de presión frente al tiempo.

A partir de las gráficas de presión obtenidas, de cada ensayo se obtiene:

- El tiempo que tarda el plástico en recorrer la distancia que separa los dos sensores.
- La presión que recibe el primer sensor en el momento en el que el plástico alcanza el segundo sensor.

5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

En la siguiente gráfica se representan los valores que se recogen de cada uno de los ensayos de inyección.



En las siguientes tablas se recogen los resultados numéricos medios obtenidos para cada una de las condiciones de proceso de inyección impuestas.

MATERIAL VIRGEN			
T ^a (°C)	VELOCIDAD (mm/s)	TIEMPO (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,64	25,2
	80	0,40	27,2
	120	0,28	28,0
240	40	0,65	24,5
	80	0,40	25,0
	120	0,28	26,5
260	40	0,66	20,4
	80	0,41	23,4
	120	0,29	24,3

MATERIAL 40% RECICLADO			
T ^a (°C)	VELOCIDAD (mm/s)	TIEMPO (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,72	32,0
	80	0,44	29,5
	120	0,39	27,9
240	40	0,73	29,5
	80	0,41	28,1
	120	0,36	26,5
260	40	0,67	29,0
	80	0,41	27,5
	120	0,35	26,0

MATERIAL 60% RECICLADO			
T ^a (°C)	VELOCIDAD (mm/s)	TIEMPO (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,71	37,0
	80	0,45	33,9
	120	0,39	32,2
240	40	0,71	35,4
	80	0,44	32,6
	120	0,38	30,4
260	40	0,71	34,2
	80	0,42	31,1
	120	0,35	28,9

MATERIAL 100% RECICLADO			
T ^a (°C)	VELOCIDAD (mm/s)	TIEMPO (s)	ΔP (MPa)
220	40	0,74	38,5
	80	0,44	35,5
	120	0,39	34,7
240	40	0,74	37,6
	80	0,42	33,9
	120	0,36	32,1
260	40	0,67	34,4
	80	0,40	32,3
	120	0,33	29,2

MOLDE CONTENUR

Se cuenta con la colaboración de CONTENUR para la realización de los ensayos de inyección experimentales con uno de sus moldes de producción y haciendo uso de sus instalaciones.

El molde utilizado para la realización de la prueba es un molde utilizado para la fabricación de cubos de 360L, un molde de grandes dimensiones que requiere para su inyección una máquina de gran tonelaje.

Este molde está instalado en una máquina de 2500 Ton, que se encuentra situada al lado de otra completamente igual y con la que puede trabajar en forma “twin”, es decir, pueden trabajar las dos máquinas de forma simultanea, obedeciendo a un único panel de control proporcionando así una máquina de 5000 Ton de fuerza de cierre.

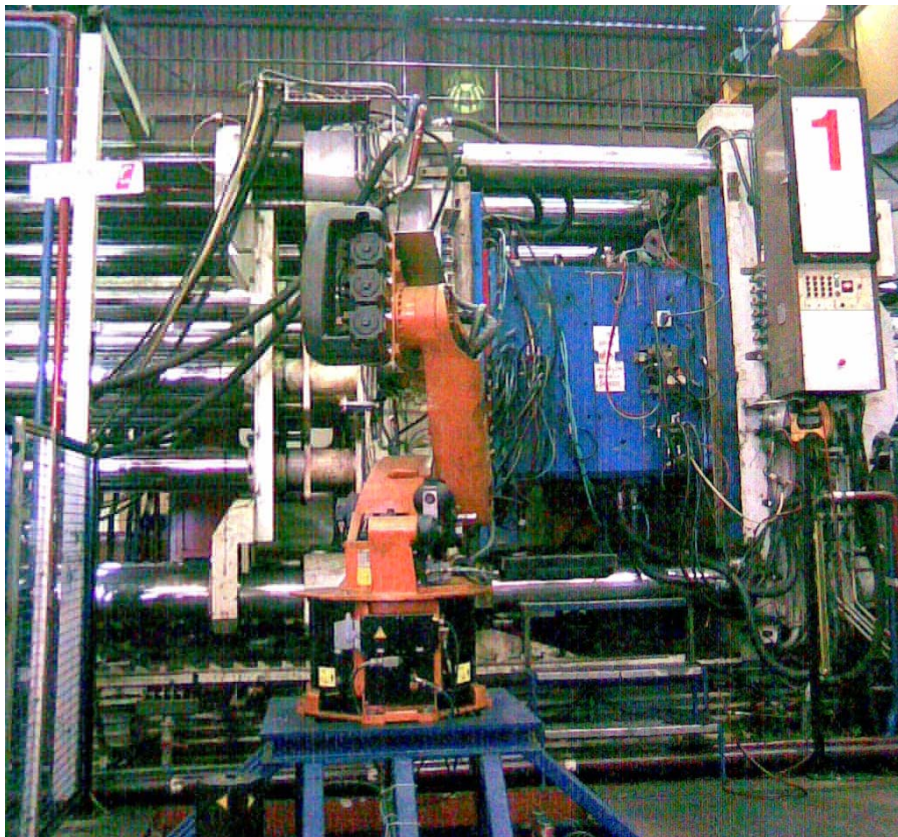


Fig. Imagen del molde de 360L introducido en el interior de la máquina en CONTENUR

5.- Caracterización de un PEHD utilizando el método desarrollado.

Como se aprecia en la imagen anterior, existe un robot que se encarga de la extracción de la pieza inyectada del interior del molde y transporta la pieza a las operaciones posteriores de estampación, pesado y montaje.

La instalación del robot aumenta el rendimiento de la máquina y la seguridad del operario, mejora su extracción y reduce las deformaciones que se producen durante este proceso ya que se realiza cuando la pieza está todavía caliente con el objetivo de reducir el tiempo de ciclo al máximo posible. También reduce la mano de obra necesaria para la manipulación de las piezas inyectada. Todos estos motivos favorecen la reducción considerable del coste unitario de pieza.

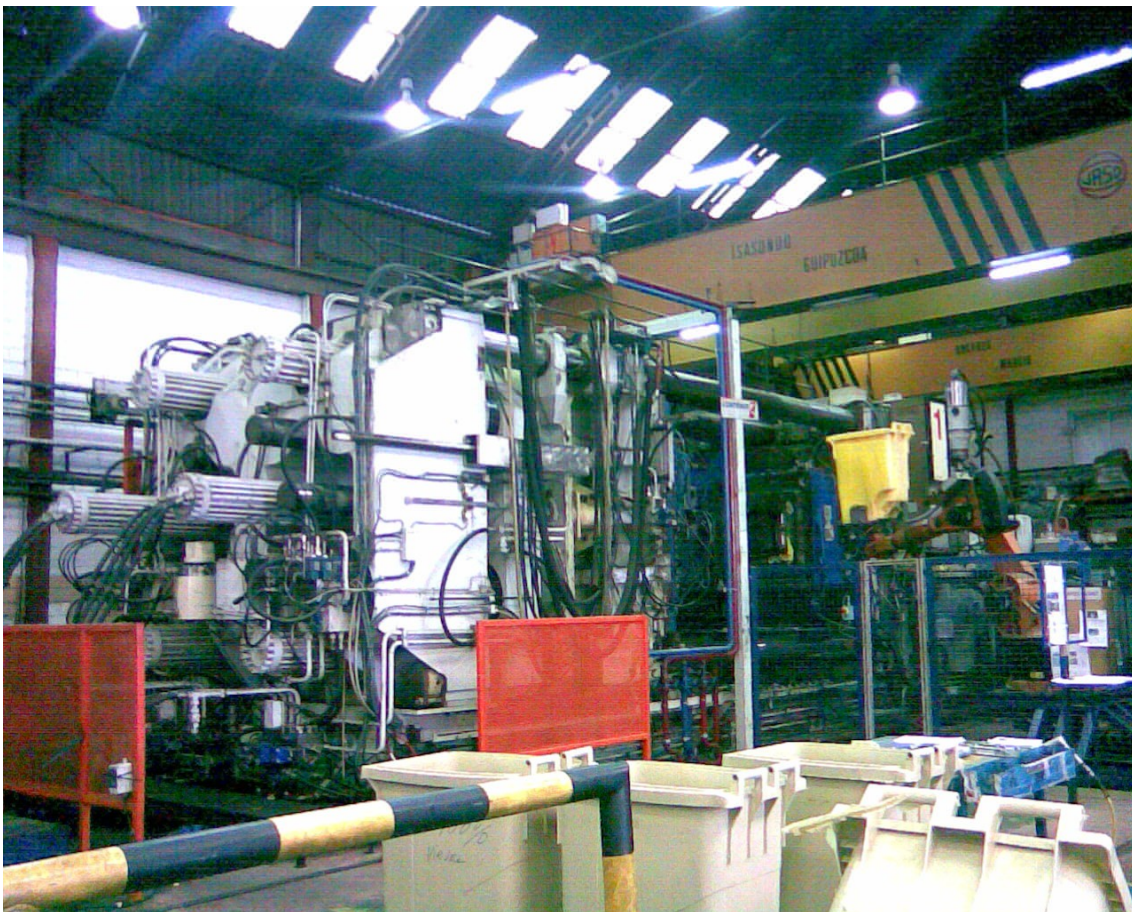


Fig. Imagen de la extracción de una pieza del interior del molde por el robot.

Cuando se trabaja a nivel de laboratorio se pueden realizar muchas pruebas, con distintos parámetros y materiales, pero cuando las pruebas de inyección se hacen a nivel industrial, las variantes de ensayo que se modifican en cada prueba se limitan por cuestiones técnicas y económicas.

Por varios motivos las pruebas experimentales realizadas con el cubo de 360L solo se realizan con dos materiales, material virgen y material 100% reciclado.

El objetivo de esta prueba experimental es comprobar que las tendencias que se observan en los modelos viscosos calculados y analizados son las mismas que se presentan en las inyecciones reales en condiciones industriales.

Por otro lado, el gasto de material que supone el ajuste de parámetros y la estabilización de la inyección con cada material es muy elevado. Es uno de los inconvenientes de trabajar con piezas inyectadas de gran tamaño y uno de los motivos por lo que es tan importante el análisis reológico del material reciclado.

El gasto económico que hay que tenerse en cuenta cuando se realizan inyecciones de plástico no es únicamente el de material, tan costoso o mas es el gasto derivado de la utilización de la máquina y de los operarios necesarios para su funcionamiento.

Trabajando con piezas de gran tamaño, el tiempo de ciclo necesario para la inyección de una sola pieza es muy elevado, lo que supone un gran costo a gravar en el precio final de la pieza como coste de máquina.

También hay que tener en cuenta el tiempo empleado, no solo el de la inyección de cada una de las piezas sino el que hay que esperar para que la máquina se estabilice con los parámetros de proceso impuestos, tiempo y material de piezas inyectado que hay que tener en cuenta en la realización del ensayo experimental.

Por todos estos motivos, la realización de esta prueba experimental consta de la determinación de unos parámetros óptimos de inyección con el material virgen, y la inyección son estos mismos parámetros de proceso con material con un 100% de material reciclado.

Al utilizar los mismos parámetros de proceso, todos los resultados que se obtengan de las inyecciones realizadas con los dos materiales serán comparables entre sí.



Fig. Imagen de un cubo de 360L inyectado.

Los parámetros de proceso utilizados para la realización de esta prueba experimental se detallan a continuación en la tabla.

<u>CONDICIONES DEL PROCESO</u>	
MATERIALES	SABIC HDPE M40060S Virgen y 100% del mismo material reciclado
T^a DE INYECCIÓN	240° C
TIEMPO DE INYECCIÓN Y COMPACTACIÓN	26 s
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	
PRESION DE COMPACTACIÓN	3s al 65% de la P máx. de la máquina. 3s al 55% de la P máx. de la máquina resto del tiempo hasta completar los 26 s al 50 %.
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
T^a DEL REFRIGERANTE	9 °C
TIEMPO DE REFRIGERACIÓN	65 s.

<u>MATERIAL VIRGEN</u>	
<u>RESULTADOS DEL PROCESO</u>	
TIEMPO DE LLENADO	10,5 s
PRESIÓ MÁXIMA DE INYECCIÓN	84 Bar.
TIEMPO DE CICLO	131 s.

La siguiente imagen es la gráfica que ofrece la máquina de inyección para cada una de las inyecciones que realiza, representa velocidades y presiones de inyección en función de la posición de avance del husillo y presiones en función del tiempo de compactación.

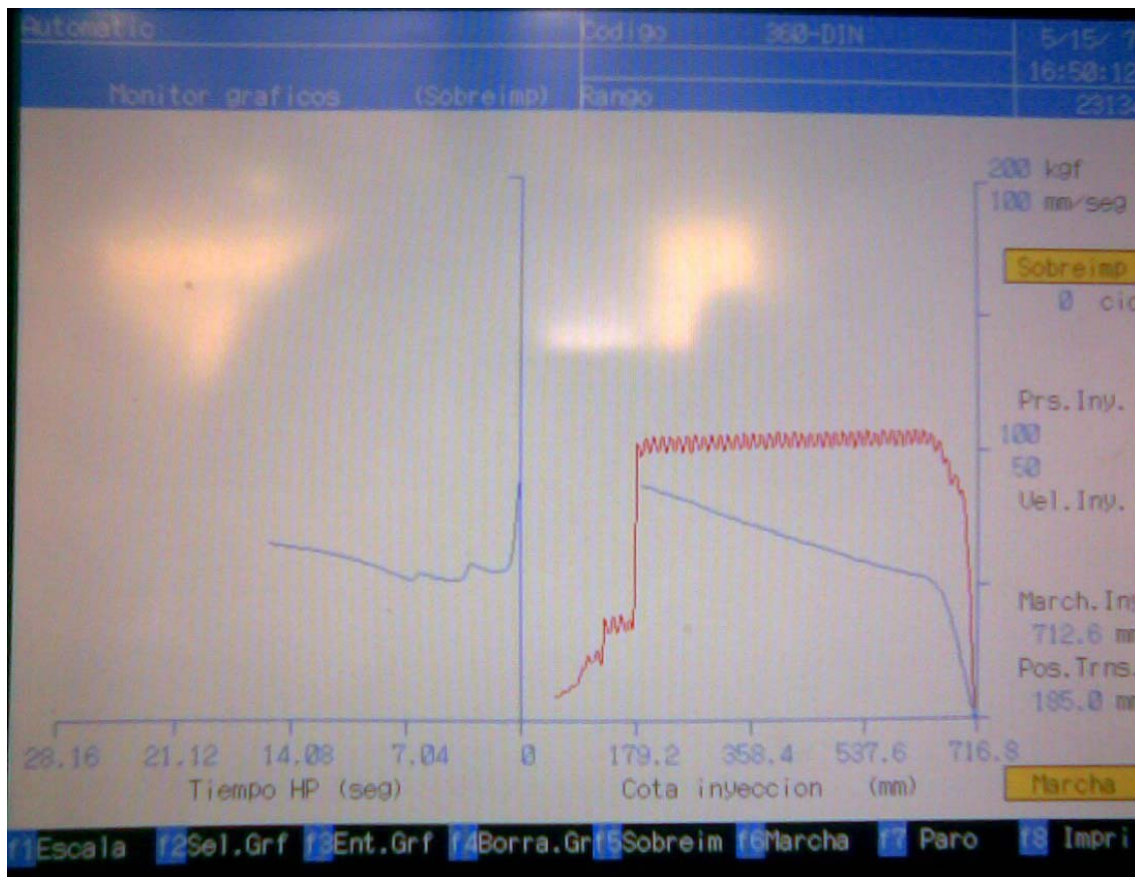


Fig. Gráfica de inyección obtenida de los monitores de control de la máquina de inyección.

En la parte derecha de la gráfica se representa la fase de llenado de la pieza.

La línea roja se corresponde con la velocidad de avance del husillo para cada posición de husillo, es decir, representa gráficamente la programación de velocidades realizada por el husillo durante la fase de inyección como resultado de la programación de velocidades introducida en los controles de la máquina.

La línea azul representa la evolución de la presión hidráulica realizada por la máquina de inyección durante la fase de llenado, para cumplir las condiciones de proceso impuestas.

En la parte izquierda de la gráfica se representa la fase de compactación.

En este caso no aparece línea roja, ya que durante esta fase del ciclo la velocidad con la que el material avanza por el interior del molde no se controla directamente por ningún parámetro de máquina.

La línea azul representa la evolución de la presión hidráulica realizada por la máquina en función de la evolución del tiempo, es decir, representa gráficamente la programación de presiones de compactación que realiza la máquina como resultado de la programación introducida en los controles de la máquina.

La gráfica comienza con el tiempo igual a cero ya que la gráfica tiene su inicio en el momento en el que se produce el cambio de primera a segunda fase.

<u>MATERIAL 100% RECICLADO</u>	
<u>RESULTADOS DEL PROCESO</u>	
TIEMPO DE LLENADO	10,6 s
PRESIÓ MÁXIMA DE INYECCIÓN	100 Bar.
TIEMPO DE CICLO	124 s.



Fig. Gráfica de inyección obtenida de los monitores de control de la máquina de inyección.

La interpretación de las curvas de la imagen anterior es la misma que la explicada para el caso del material virgen, solo que en este caso tenemos reflejado en una misma gráfica la evolución de la presión en la fase de llenado y en la de compactación para los dos materiales ensayados.

La curva de azul más claro se corresponde con el ensayo realizado con el material virgen y la curva dibujada con azul mas oscuro se corresponde con la evolución de la presión hidráulica durante el ciclo de inyección durante el ensayo con el material 100% reciclado. De esta forma no solo es posible compara los valores máximos resultantes de las pruebas de inyección realizadas sino también las curvas de presión de inyección que proporciona el control de la máquina de inyección.

5.1.2.6.- Análisis de resultados y conclusiones.

MOLDE ESPIRAL.

Con el molde espiral se han realizado tanto pruebas de inyección reales como simulaciones de inyección con los mismos materiales y bajo las mismas condiciones de proceso.

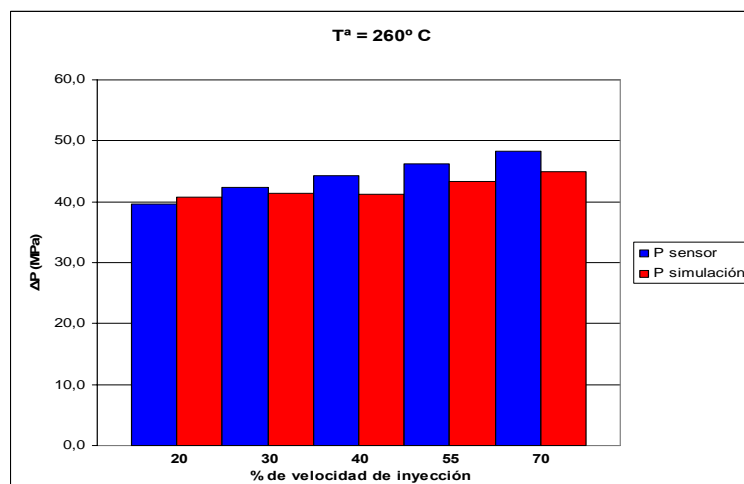
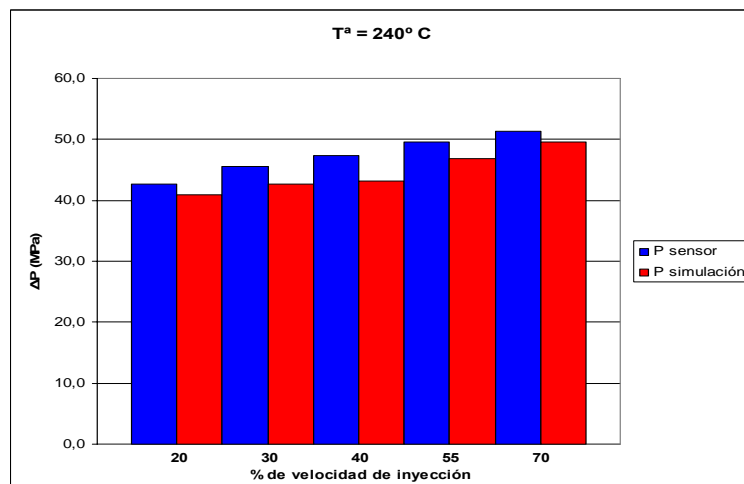
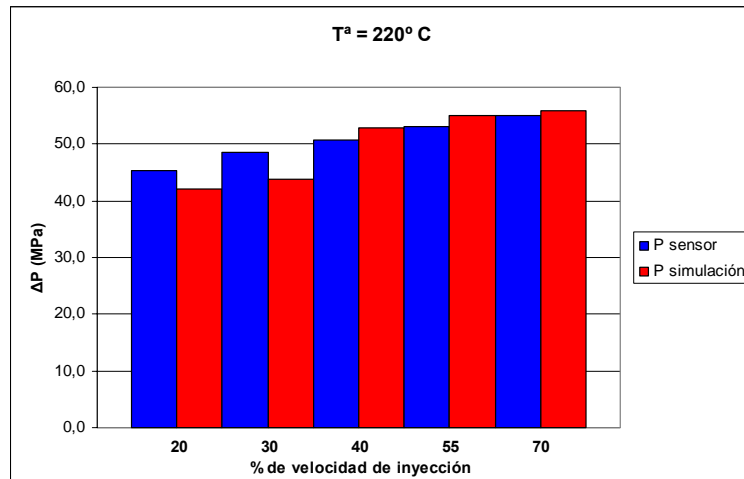
En ambos casos no solo se han obtenidos los resultados generales de inyección; presión máxima de inyección, fuerza de cierre...sino que también se han recogidos valores de presión en el interior del molde durante las pruebas de inyección real en dos puntos concretos de la pieza a través de los sensores de presión con los que está dotado el molde.

Al realizar las simulaciones de inyección se recogen de cada caso los valores de presión de inyección en los dos puntos del modelo geométrico que se corresponden con la posición de los sensores de presión en el molde, y el tiempo que tarda el plástico en recorrer la distancia que separa esos dos puntos.

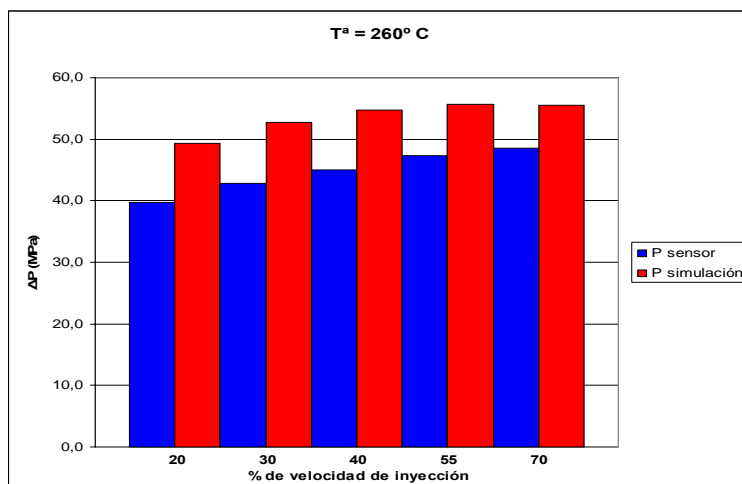
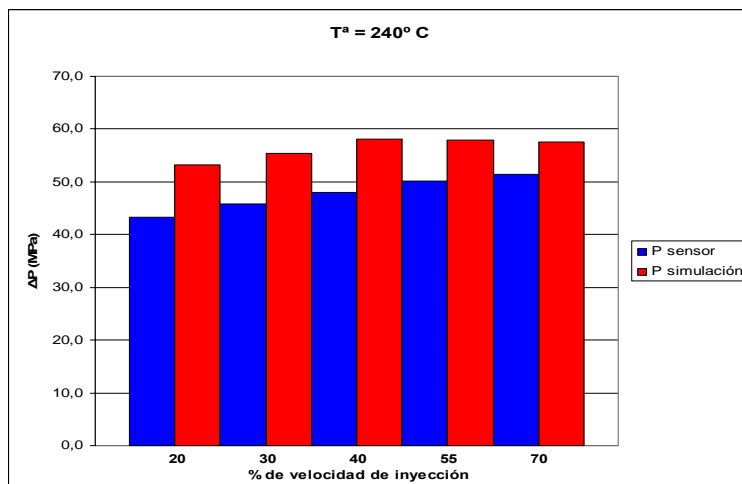
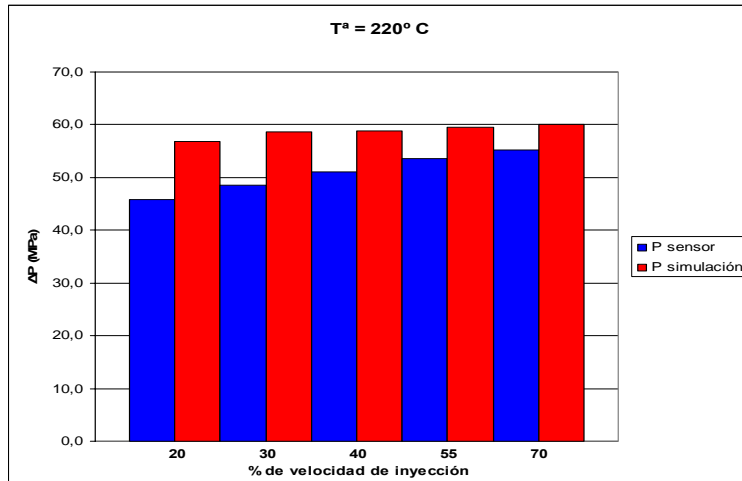
De esta forma se obtienen valores comparables entre si tanto de los ensayos de inyección real como de los casos de inyección simulados.

En las siguientes tablas se comparan las caídas de presión obtenidas en las pruebas de inyección reales y en las simulaciones realizadas.

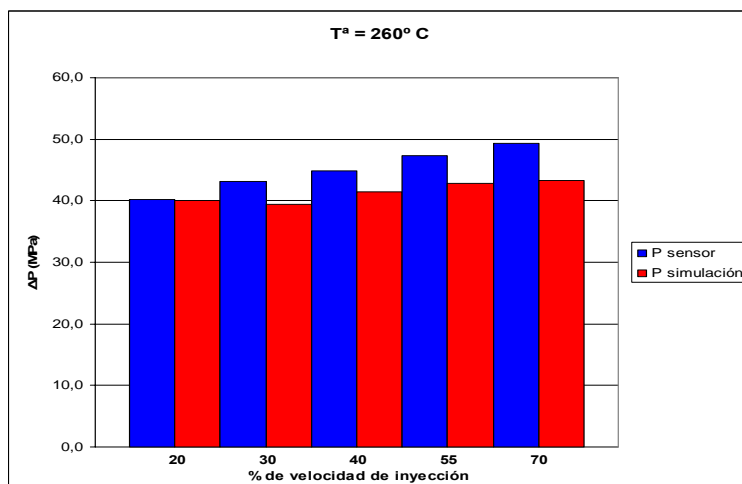
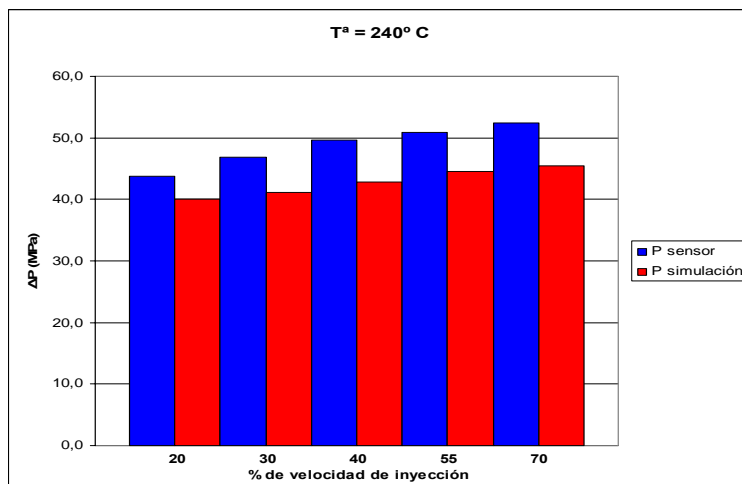
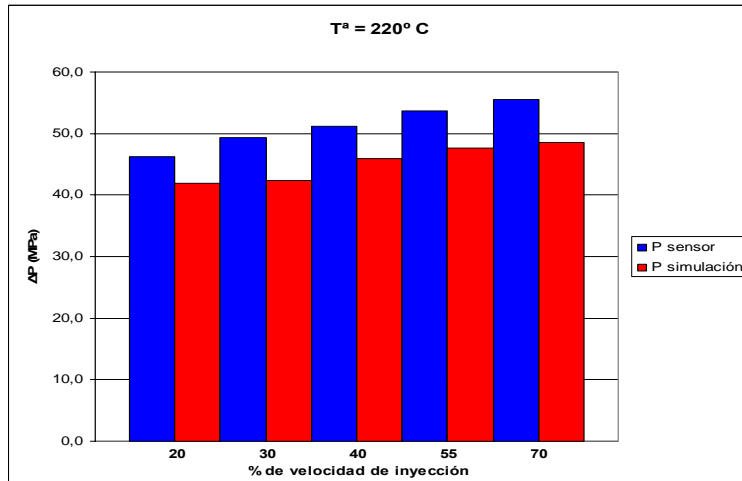
MATERIAL VIRGEN



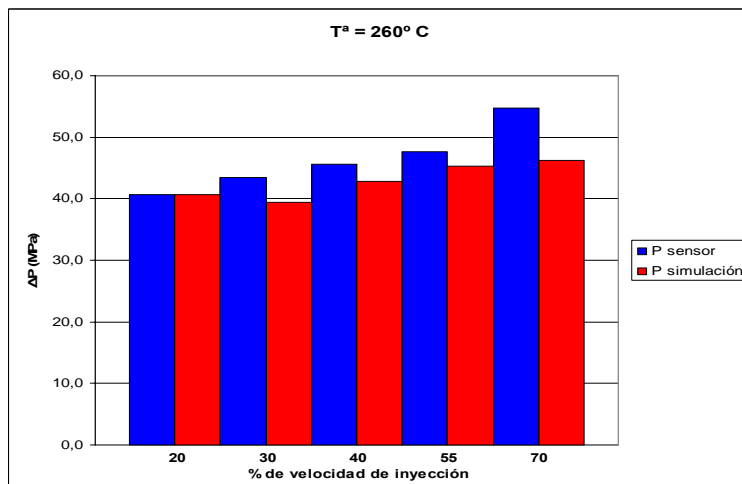
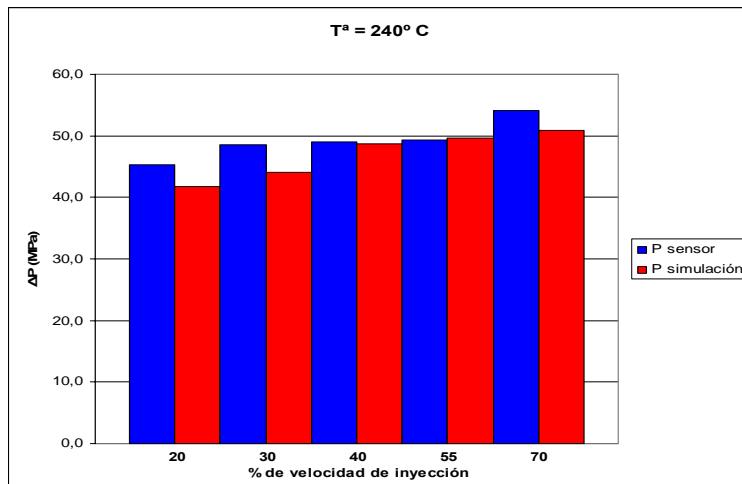
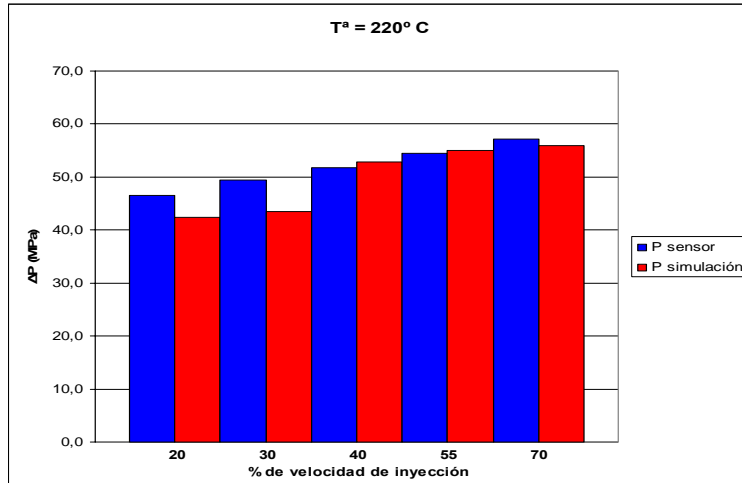
MATERIAL 20% RECICLADO



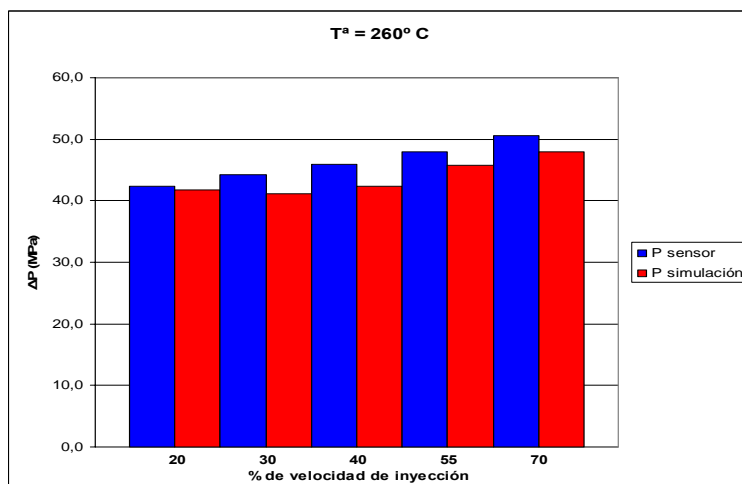
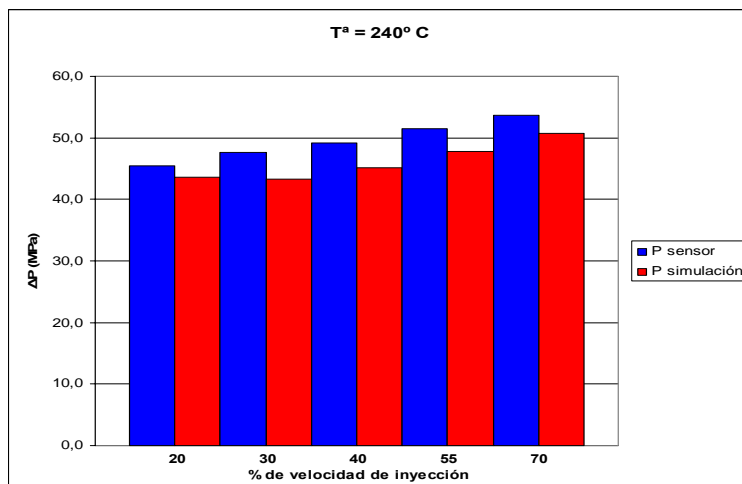
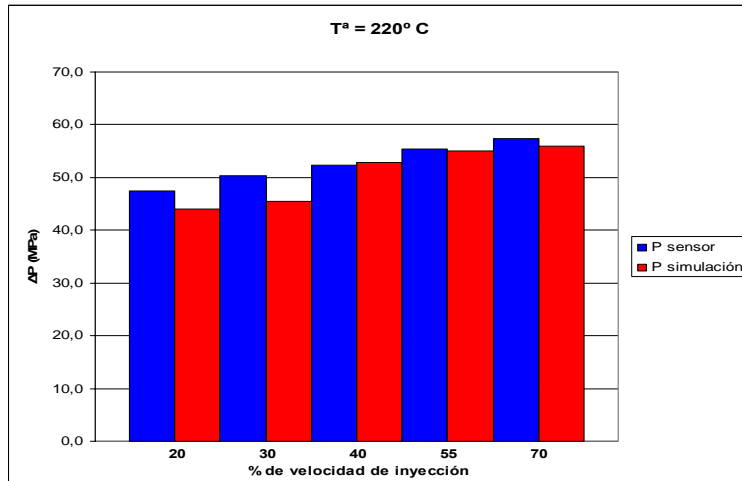
MATERIAL 40% RECICLADO



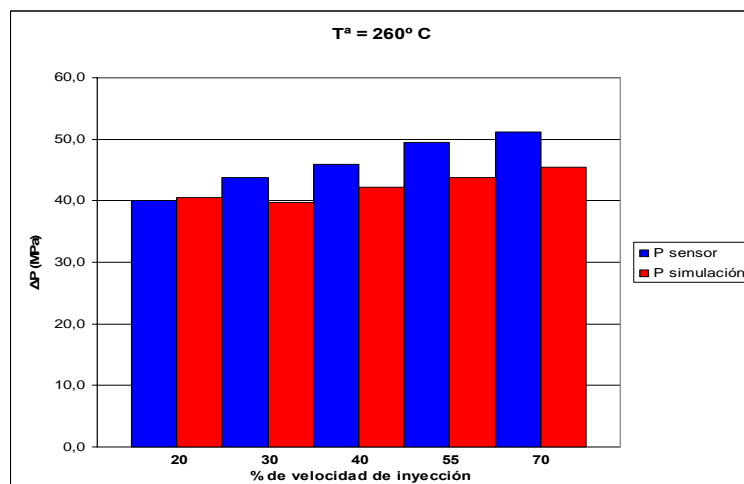
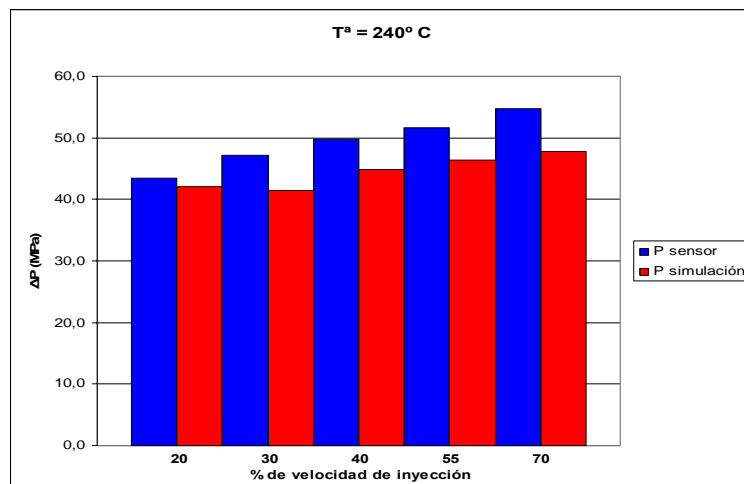
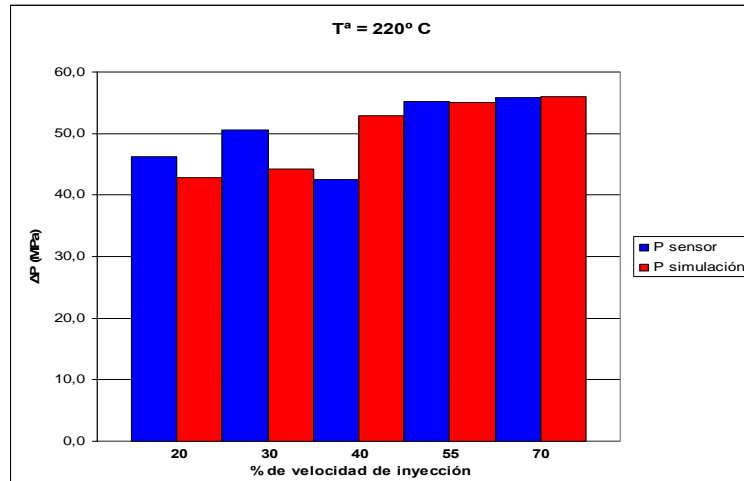
MATERIAL 60% RECICLADO



MATERIAL 80% RECICLADO



MATERIAL 100% RECICLADO



Como se aprecia en todas las gráficas anteriores, los resultados de caída de presión obtenidos en los ensayos de inyección reales son aproximadamente entre un 4% y un 10% superiores a los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

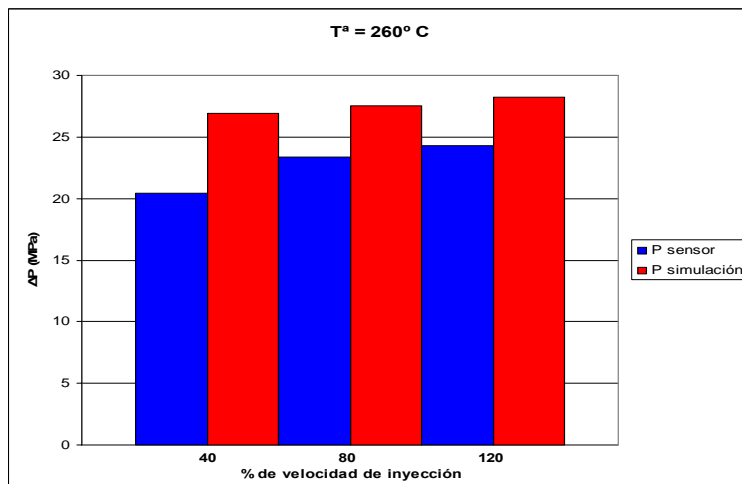
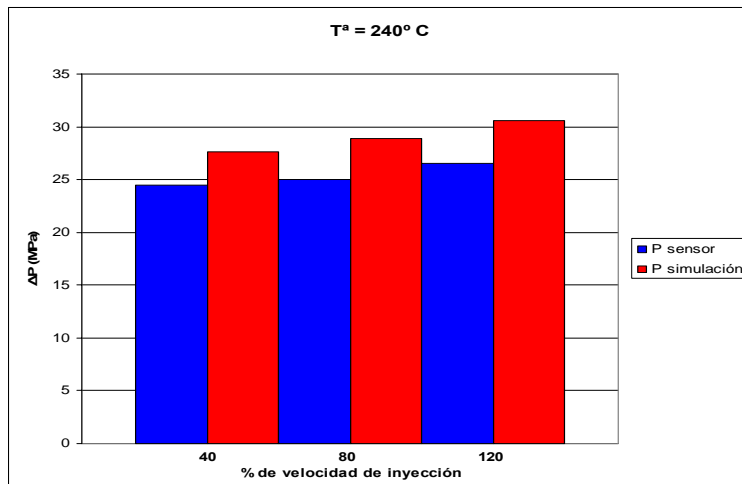
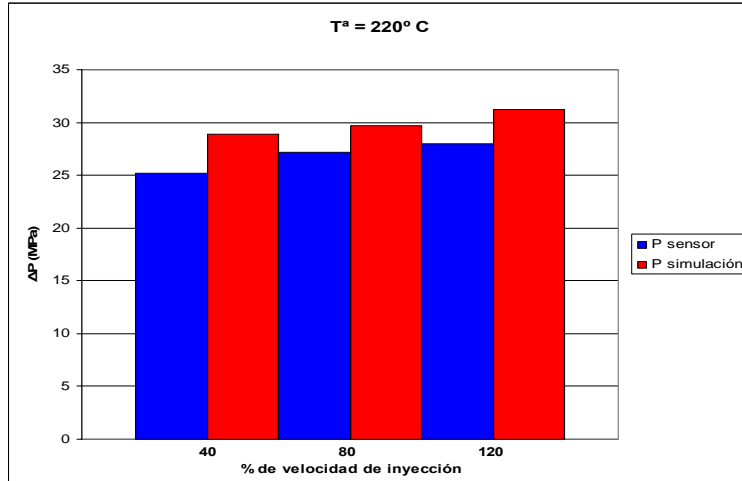
A la vista de los resultados obtenidos se puede determinar que la utilización de modelos viscosos, obtenidos a partir del molde espiral con el material analizado, para la realización de simulaciones de inyección es válida para analizar la influencia de la introducción de diferentes porcentajes de material reciclado y se puede deducir, que sería válido para el análisis de la influencia de otros factores intrínsecos del proceso de inyección. Desde el punto de vista cuantitativo los resultados de presión se pueden considerar valores aproximados que pueden variar ligeramente respecto a los valores que se obtengan en la realidad, para el material analizado esta diferencia se encuentra por debajo de un 10%.

MOLDE PLACA.

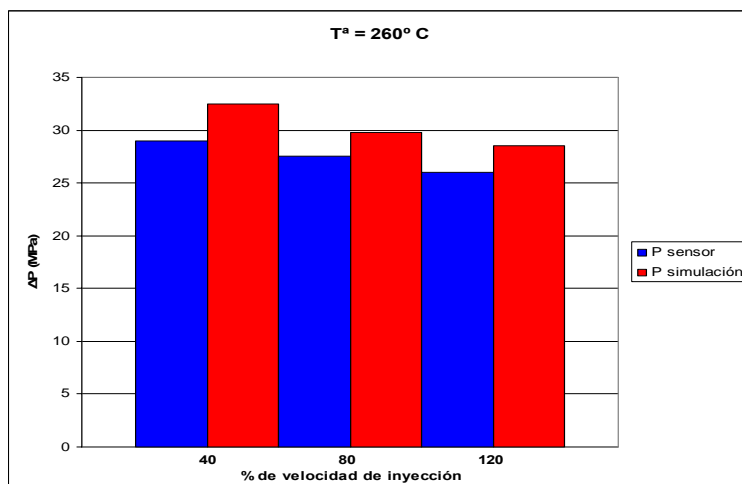
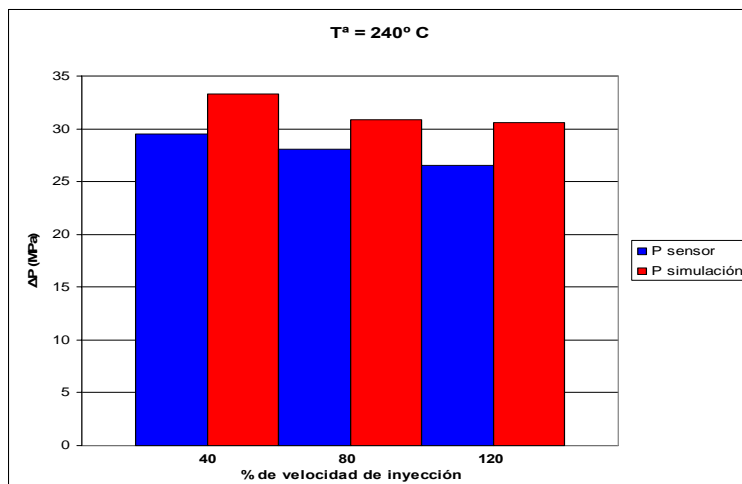
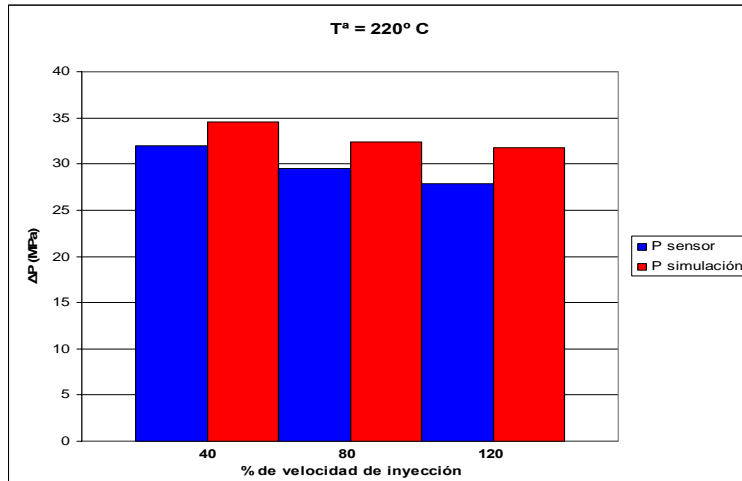
Los ensayos de inyección reales realizados con este molde se han llevado a cabo con los mismos materiales y los mismos parámetros de inyección que los ensayos de simulación de inyección, con el objetivo de que todos los resultados que se obtengan sean comparables entre si.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, al igual que el molde espiral, este molde está dotado con rencores de presión, por lo que es posible la comparación de los valores de presión que se recogen en el interior del molde en las pruebas de inyección reales con los valores de presión obtenidos de los resultados de simulación.

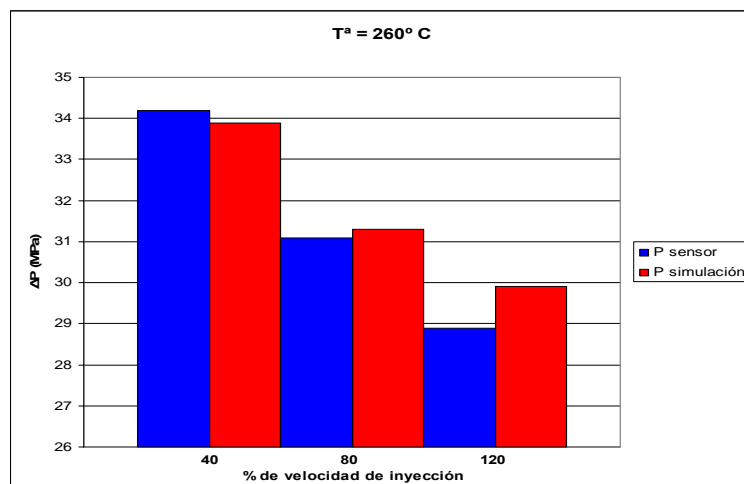
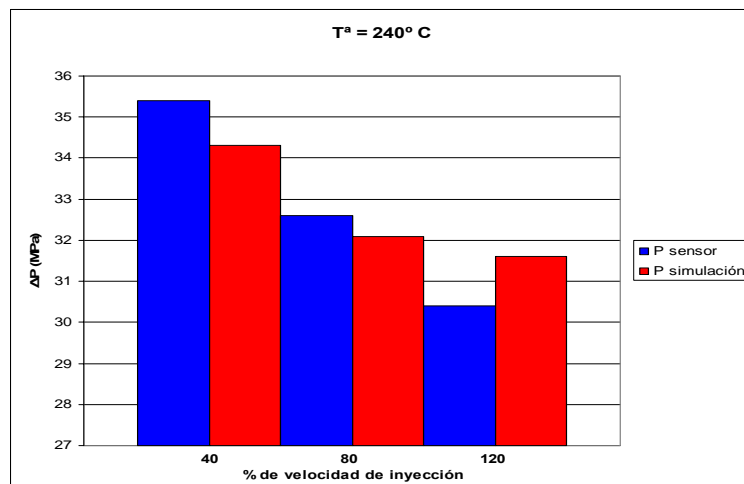
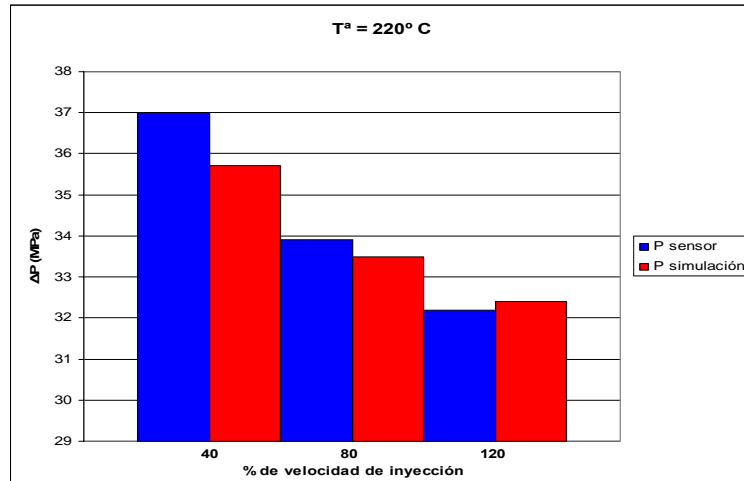
MATERIAL VIRGEN



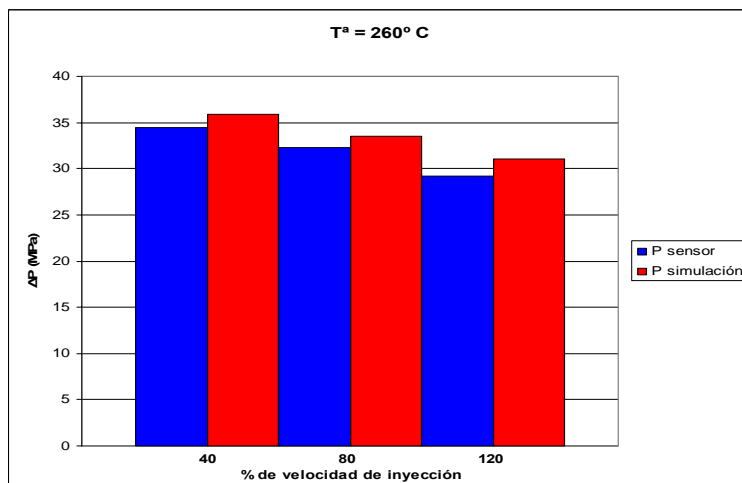
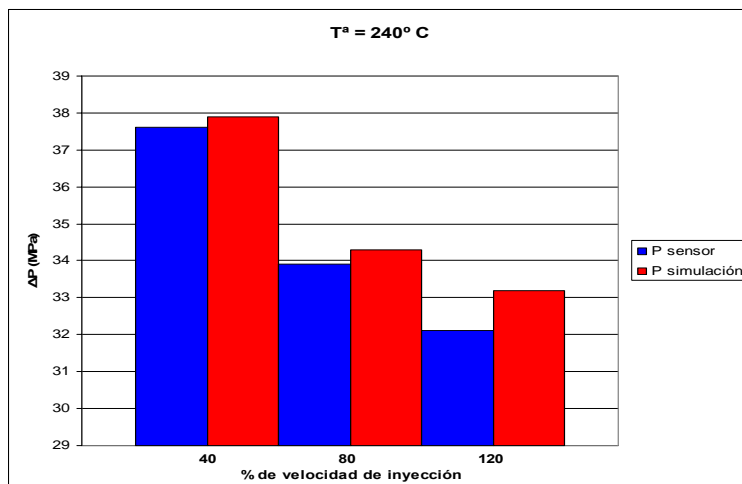
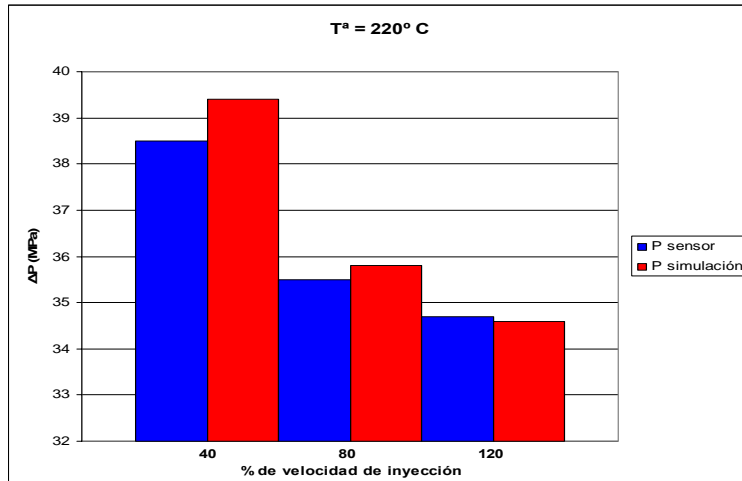
MATERIAL 40% RECICLADO



MATERIAL 60% RECICLADO



MATERIAL 100% RECICLADO



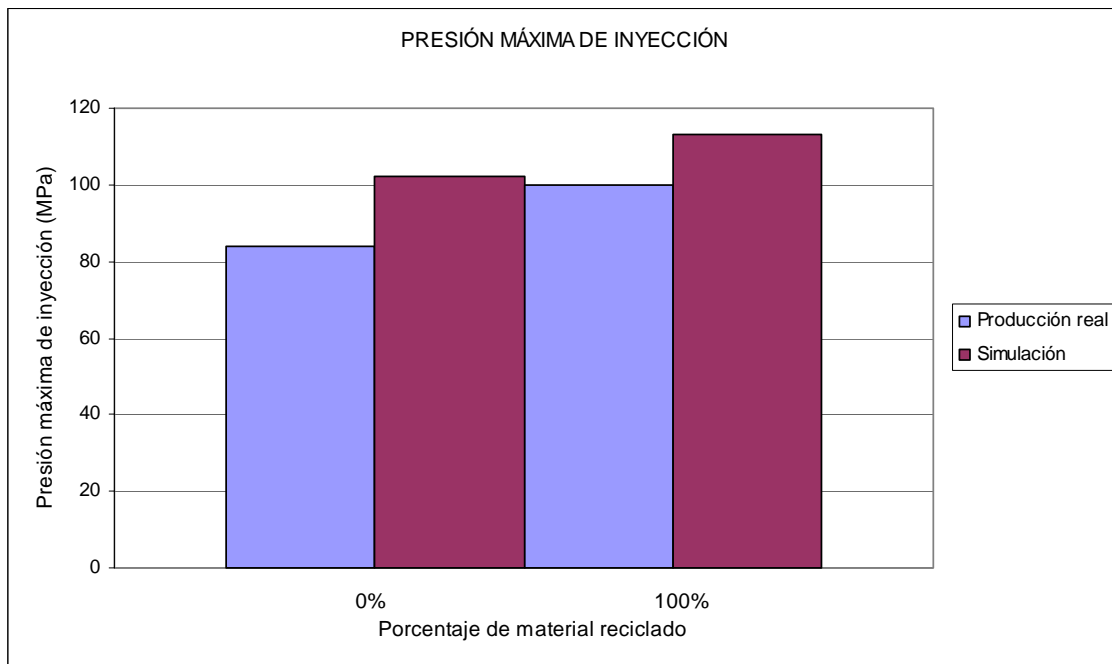
Observando las gráficas anteriores se comprueba que utilizando el modelo viscoso equivalente obtenido con el método de caracterización desarrollado en los ensayos de simulación, los resultados que se obtienen presentan las mismas tendencias que los resultados de simulación realizados con el modelo viscoso del material de la base de datos del programa de simulación.

Por otro lado, también se observa que las diferencias entre los valores numéricos que se obtiene en los análisis de inyección con cada uno de los modelos viscosos no son en ningún caso superiores a un 10%

MOLDE CONTENUR.

Se analizan y comparan los resultados obtenidos de la simulación de inyección de un molde con el modelo viscoso equivalente obtenido con el método de caracterización desarrollado, con los resultados obtenidos de la producción real de ese molde con el mismo material tanto virgen como con material 100% reciclado.

RESULTADOS		
Análisis	% Reciclado	Presión máx. (MPa)
Producción real.	0 %	84
Simulación		102
Producción real.	100 %	100
Simulación		113



Solo se puede comparar la presión de inyección, ya que la fuerza de cierre que realiza la máquina de inyección durante el ciclo no se puede conocer a través de los controles de la máquina. Durante un proceso de producción de piezas de plástico solo puedes saber en que momento se ha rebasado la fuerza de cierre de la máquina y es en el momento en el comienzan a salir rebabas en el plano de cierre del molde.

Comparando los valores de presión obtenidos en las pruebas experimentales con los obtenidos con la inyección de los modelos viscosos equivalentes calculados, se observa que:

- En ambos casos, la viscosidad del material reciclado es entre un 10 y un 15% superior a la del material virgen, ya que la relación entre viscosidad y presión de inyección es directamente proporcional.
- Para el mismo material, la diferencia entre los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y las pruebas de simulación de inyección, es de un 15%, siendo siempre superiores los resultados obtenidos de las pruebas de simulación de inyección.

5.1.3.- Análisis de la influencia del material reciclado en la viscosidad.

En este apartado se va a analizar como la introducción de diferentes porcentajes de material reciclado afecta a la viscosidad del material que se inyecta.

El análisis de esta propiedad de la mezcla de materiales que se va a inyectar es importante, ya que afecta directamente tanto a los parámetros del proceso de inyección como a la calidad de la pieza inyectada.

La viscosidad en un proceso de inyección puede ser la propiedad limitante de un material para que la inyección de una pieza pueda realizarse en una determinada máquina, condiciona y limita los parámetros de proceso que se programan en la máquina para la obtención de la pieza con una calidad optima e incluso puede provocar que una determinada geometría no pueda ser inyectada con el material elegido.

Se van a analizar en relación a los diferentes porcentajes de material reciclado, la influencia en los valores de presión obtenidos de las pruebas de inyección con el molde espiral, en los resultados obtenidos de la utilización de los valores de presión y en los modelos viscosos equivalentes obtenidos.

5.1.3.1.- Análisis de resultados.

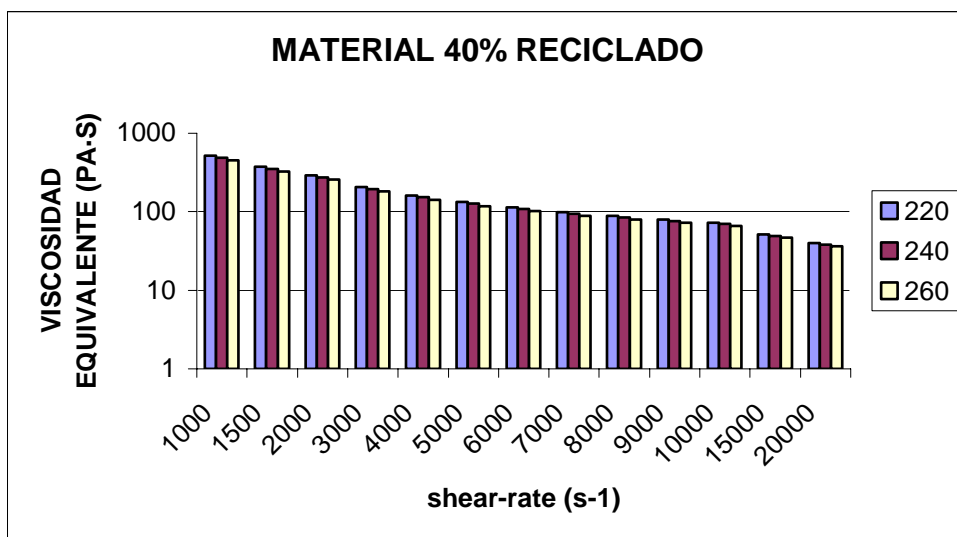
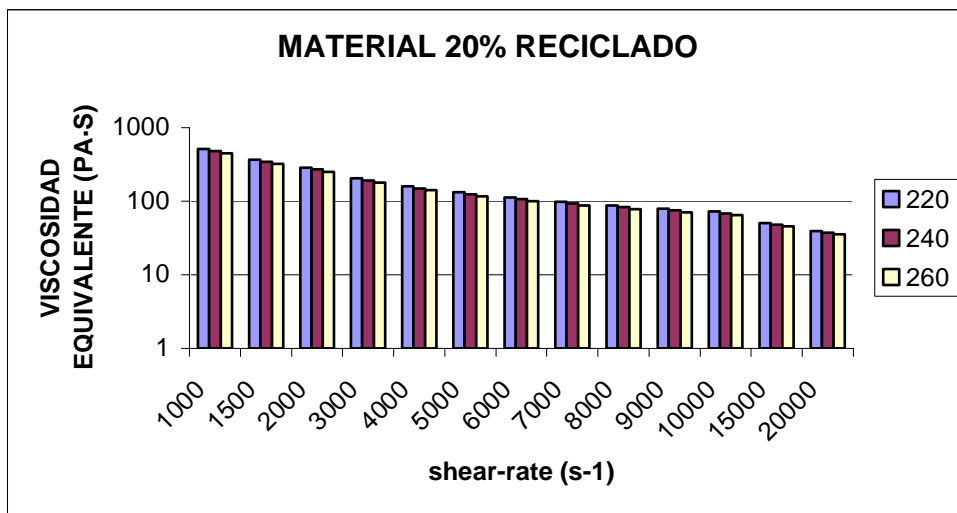
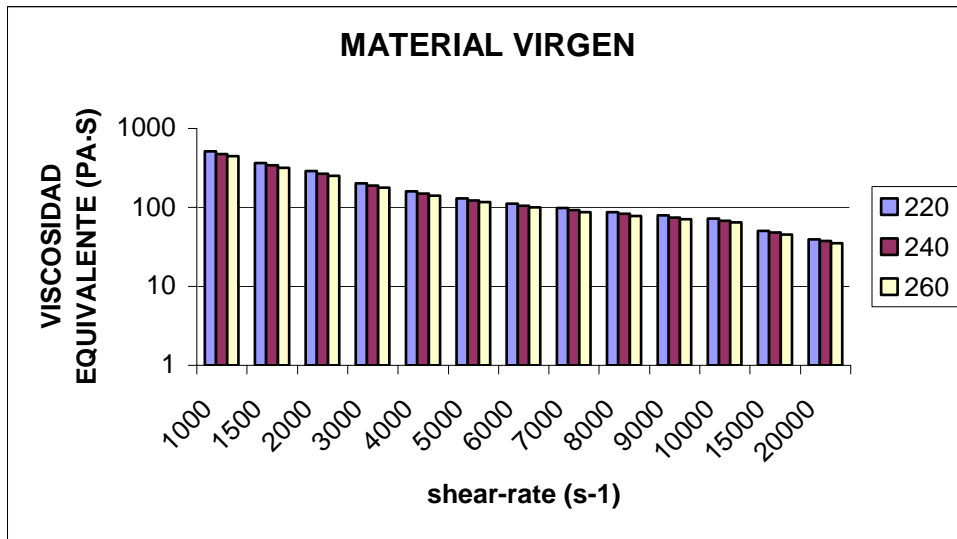
En capítulos anteriores se ha realizado el cálculo de la viscosidad equivalente a partir de los valores de presión recogidos en las pruebas de inyección del molde espiral.

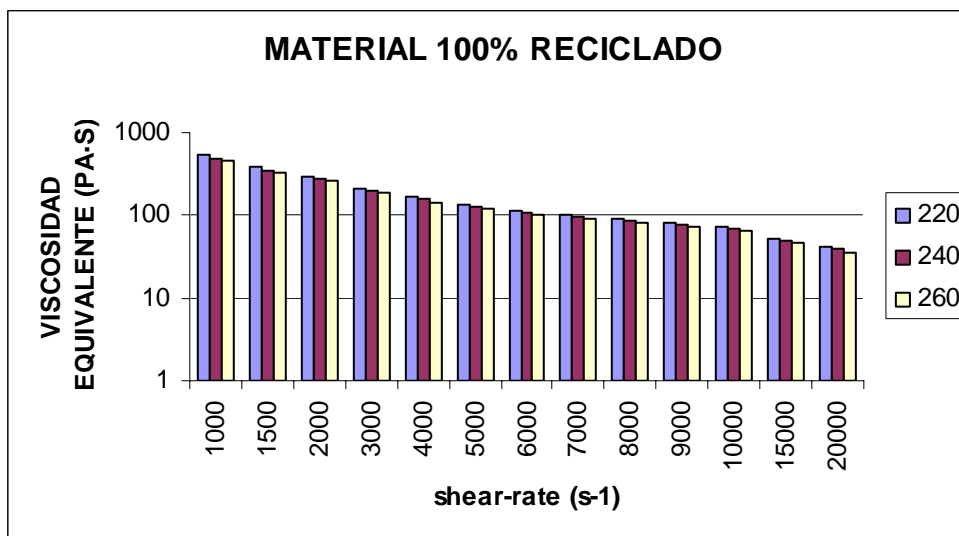
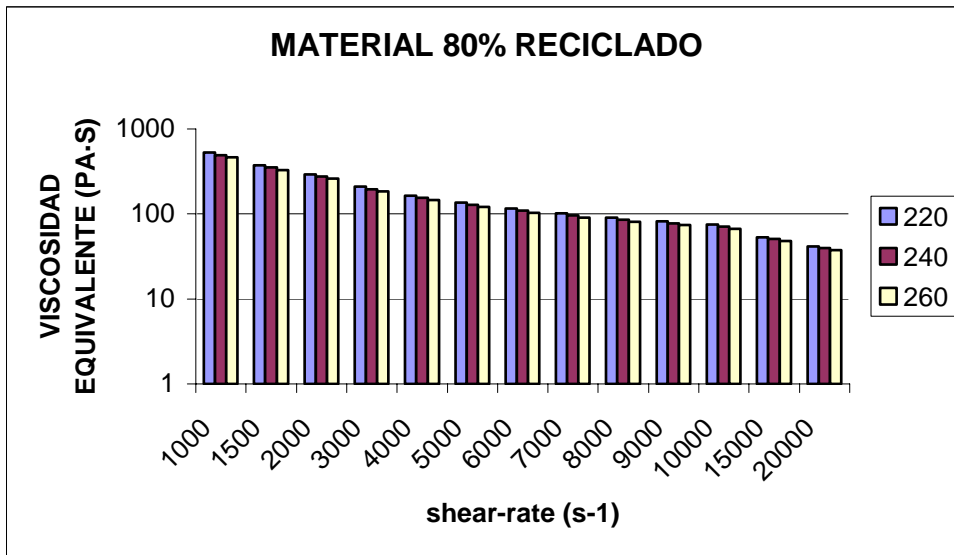
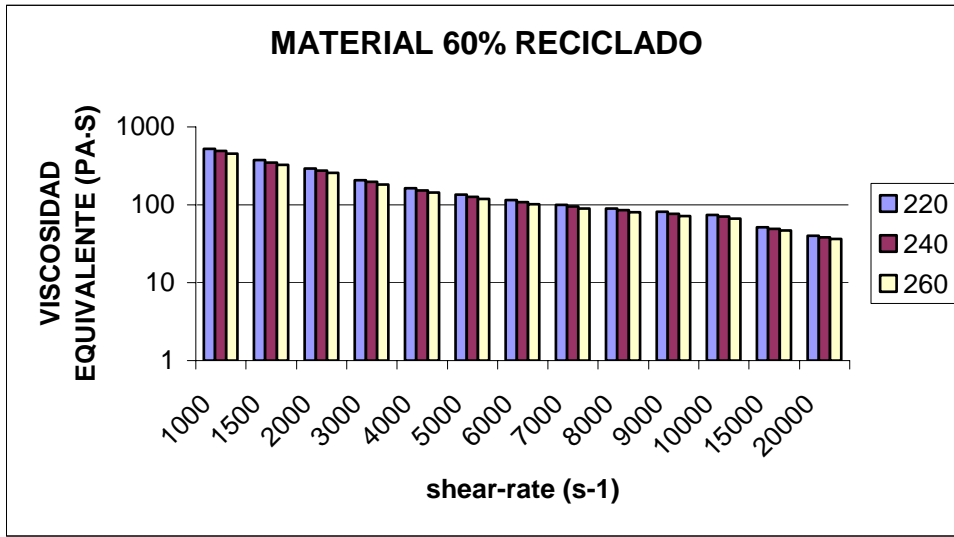
Se ha observado que la tendencia que muestran las variaciones de presión recogidas al aumentar el porcentaje de reciclado, es la misma que la de la viscosidad equivalente obtenida y que la viscosidad calculada a través de los modelos viscosos equivalentes.

Para realizar la comparación de valores de viscosidad equivalente, estos se calculan bajo las mismas condiciones de temperatura y shear rate mediante las ecuaciones de modelos viscosos equivalente obtenidas con el método de caracterización desarrollado.

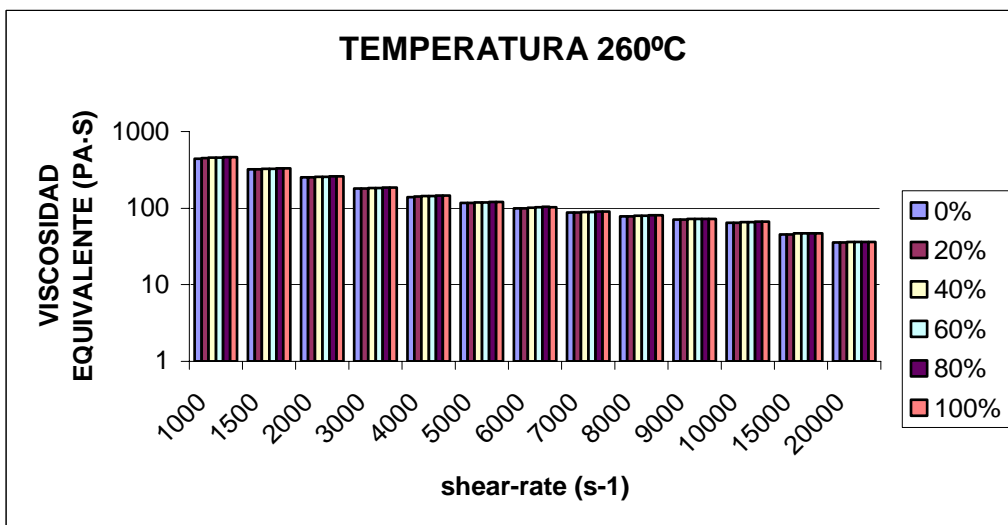
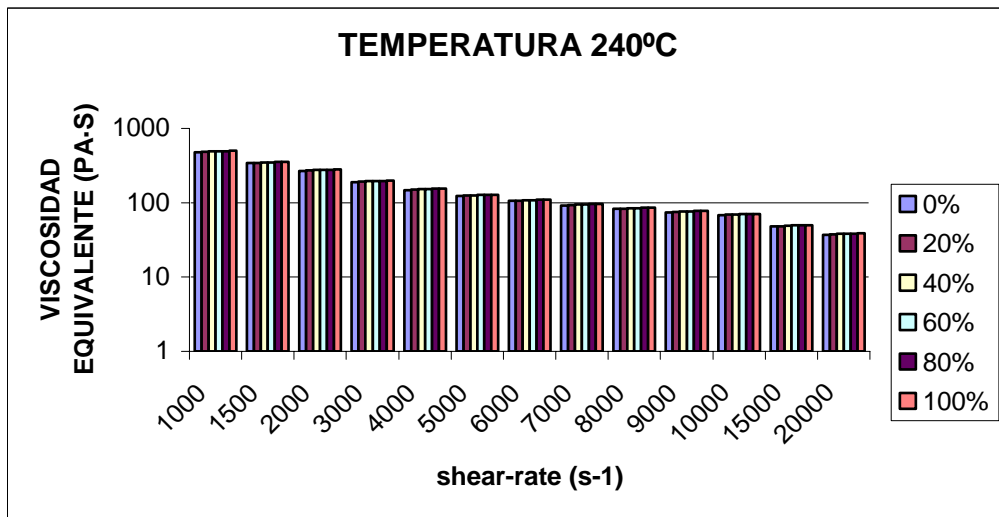
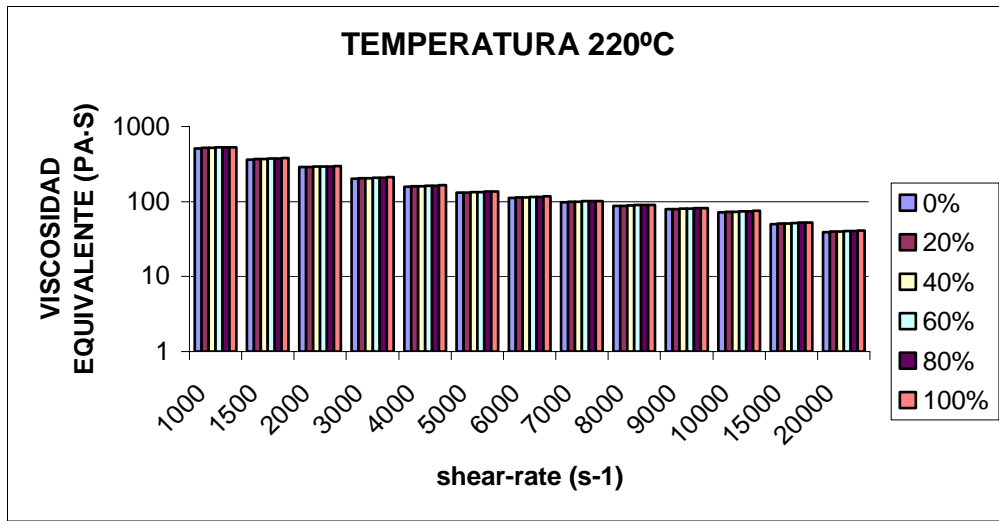
En las gráficas que se presentan a continuación se comparan valores de viscosidad equivalente para los distintos porcentajes de reciclado bajo distintas condiciones de comparación, para evaluar la influencia del material reciclado en la viscosidad del material bajo distintos aspectos.

VISCOSIDAD EQUIVALENTE PARA CADA MATERIAL, A DISTINTAS TEMPERATURAS Y DISTINTOS SHEAR RATE.

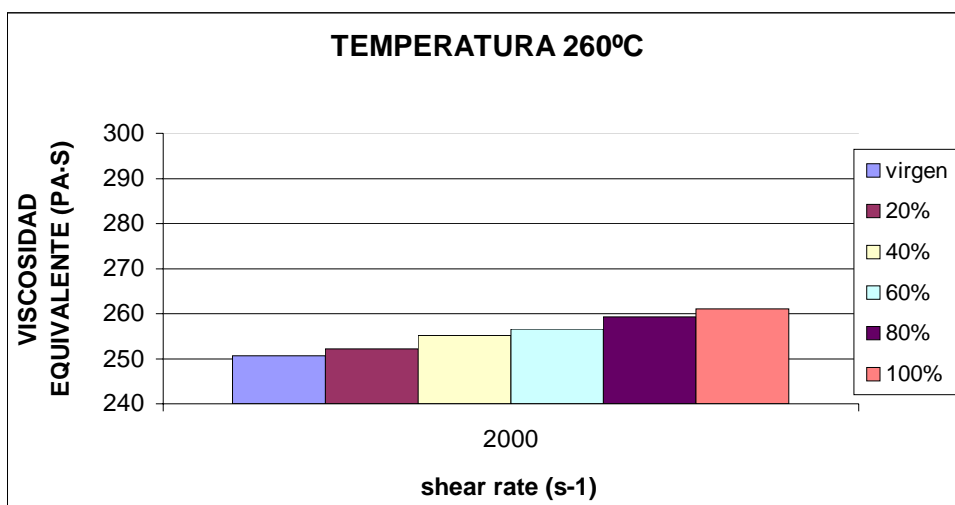
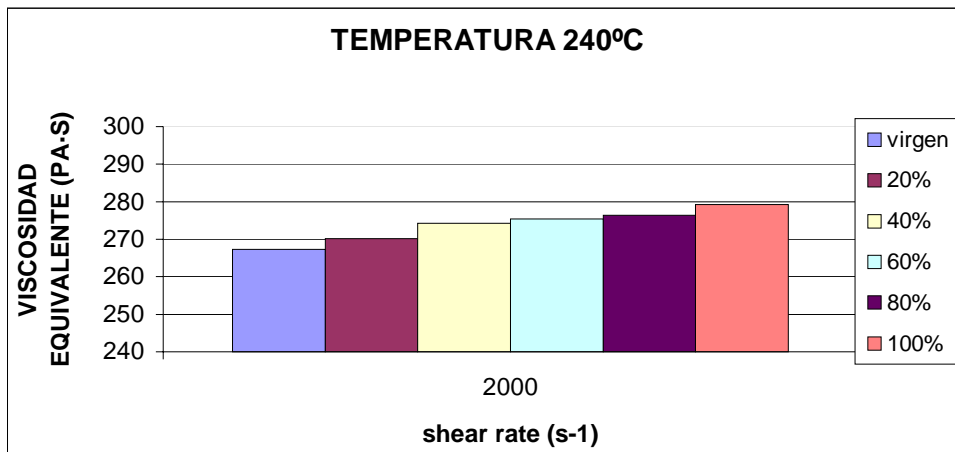
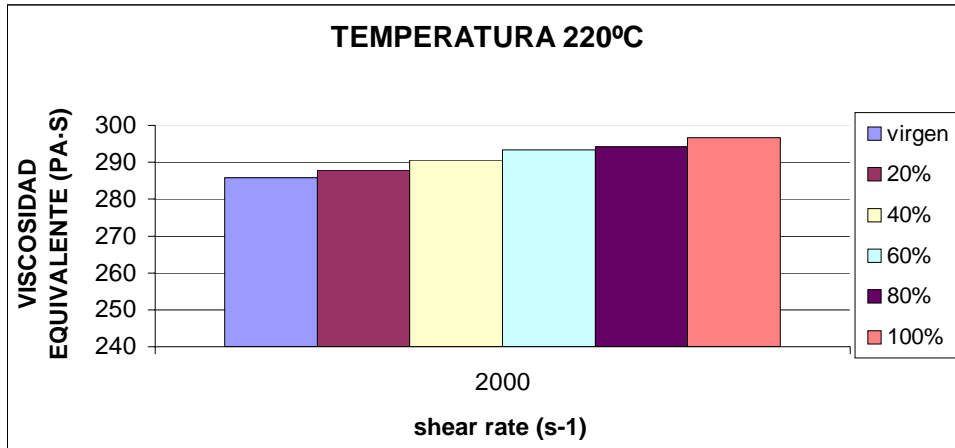




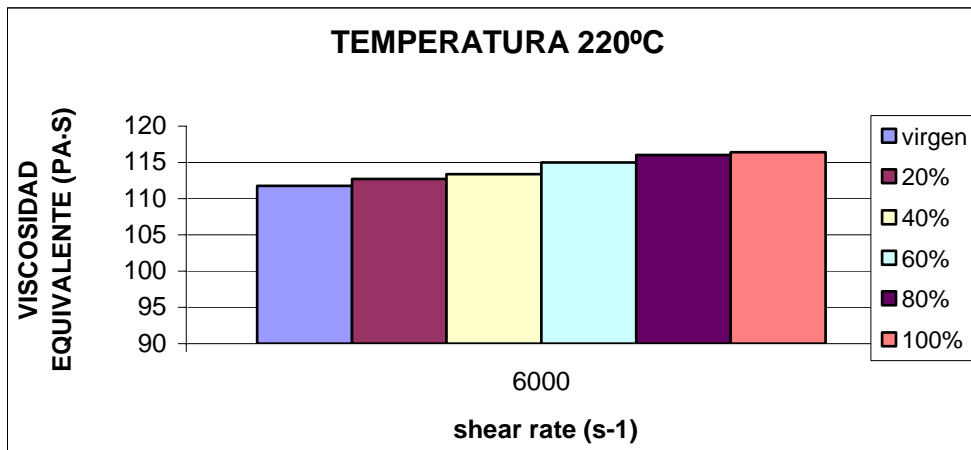
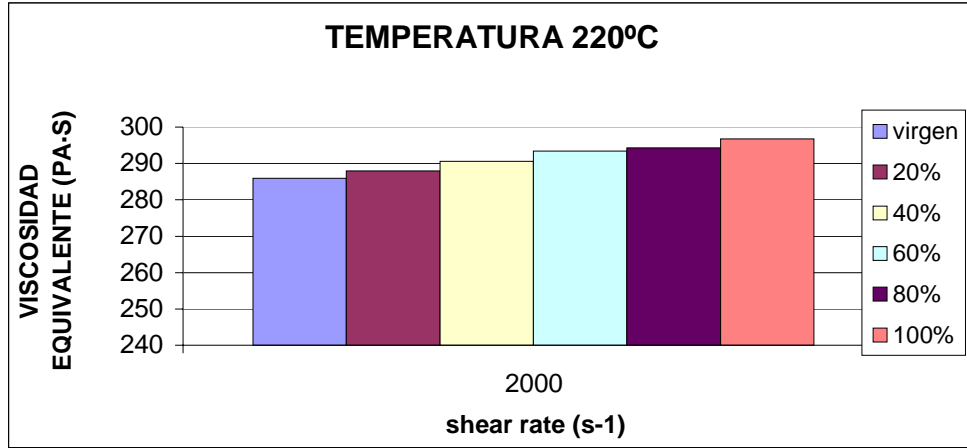
VISCOSIDAD EQUIVALENTE A CADA TEMPERATURA, PARA DISTINTOS MATERIALES Y SHEAR RATE



VISCOSIDAD EQUIVALENTE A CADA TEMPERATURA, PARA DISTINTOS MATERIALES Y UN MISMO SHEAR RATE



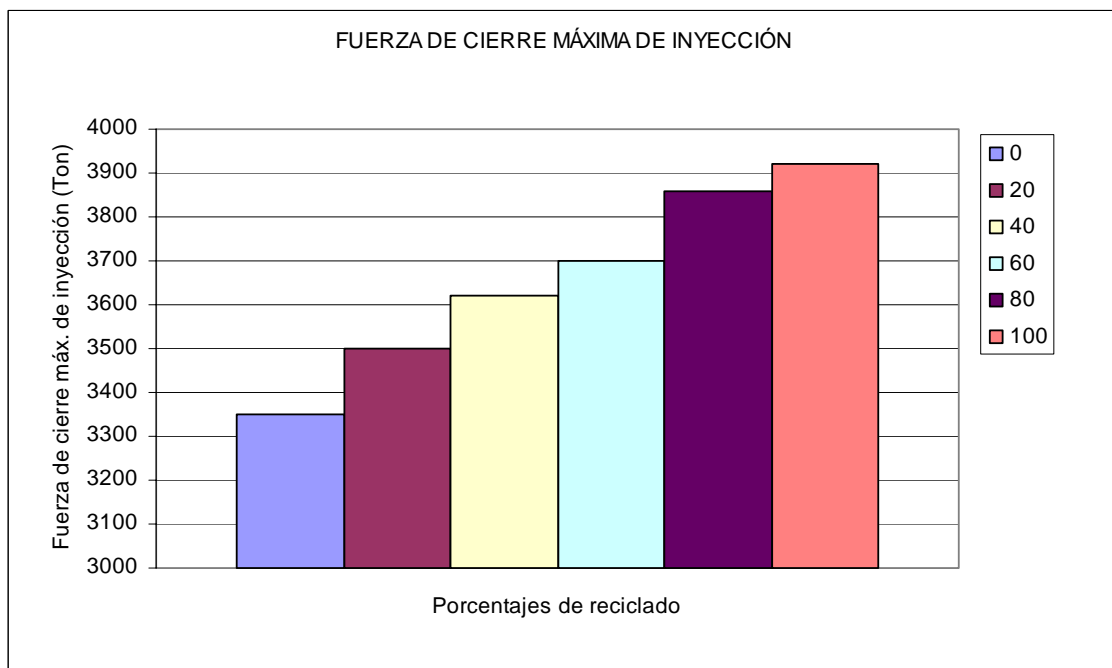
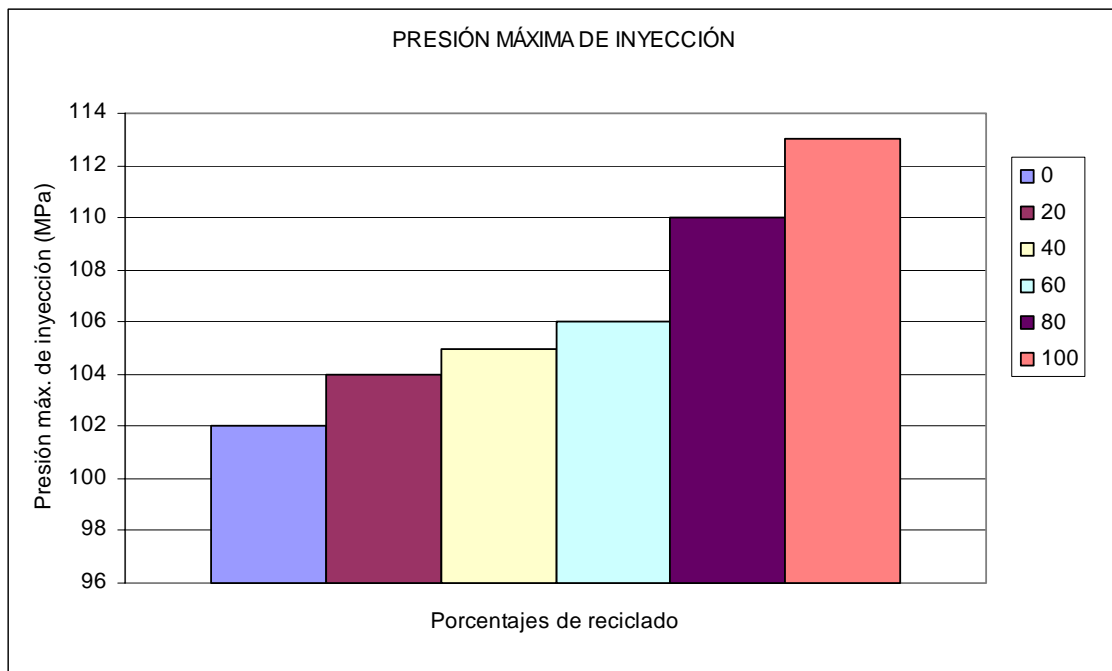
**VISCOSIDAD EQUIVALENTE PARA DOS SHEAR RATE, DISTINTOS
MATERIALES Y UNA MISMA TEMPERATURA**



COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MOLDE DE CONTENUR PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE RECICLADO.

Se analizan los resultados obtenidos de la simulación de inyección de un molde de producción real, con los distintos materiales analizados.

Los resultados se representan en las siguientes gráficas comparativas.



Del análisis de las gráficas comparativas anteriores podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Conforme aumenta el porcentaje de reciclado en la muestra analizada, la viscosidad aumenta.
- Conforme aumenta el shear rate, la viscosidad disminuye de forma semejante con todos los porcentajes de reciclado.
- Conforme aumenta la temperatura, las diferencias entre los valores de viscosidad tienden a ser menores, para el material virgen. Fenómeno que se acentúa según aumenta el shear rate
- Al aumentar el porcentaje de material reciclado, la influencia de la variación de temperatura en la variación de viscosidad es menor.

5.1.3.2.- Comparación con la caracterización realizada mediante un reómetro capilar.

En este apartado se va a comparar los resultados de caracterización reológica del polietileno de alta densidad obtenidos mediante el método desarrollado con diferentes porcentajes de reciclado con los obtenidos mediante una caracterización con un reómetro capilar.

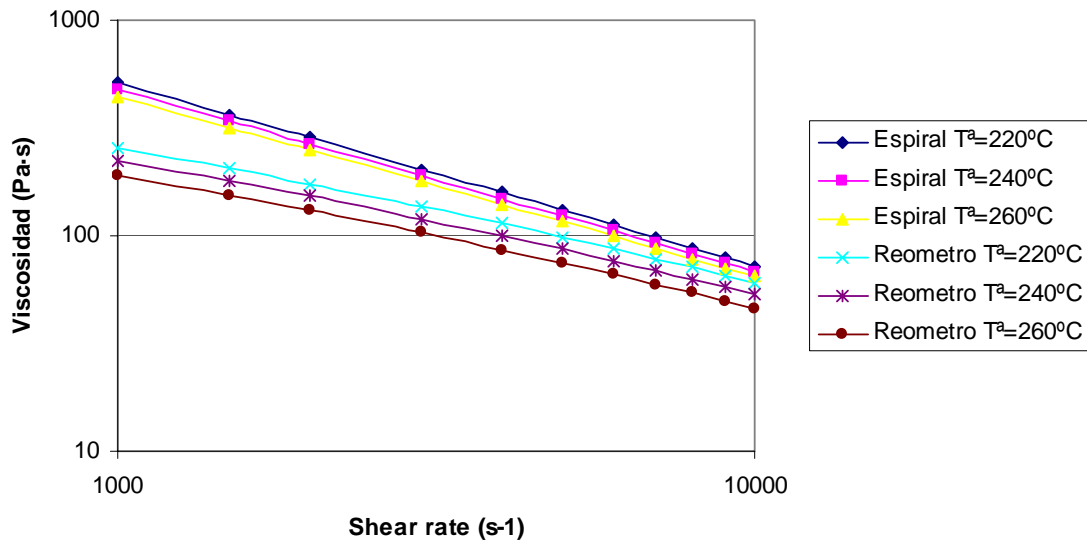
Al trabajar con el reómetro capilar se ha seguido un método de trabajo semejante al reflejado en el apartado 5.1.1. “Trabajos previos”, teniendo un especial cuidado en la carga del material, buscando la mezcla homogénea del mismo.

Viscosidad

Se comparan las curvas de viscosidad resultantes de los modelos viscosos obtenidos por cada uno de los métodos de caracterización, de todos los materiales analizados, a tres temperaturas distintas.

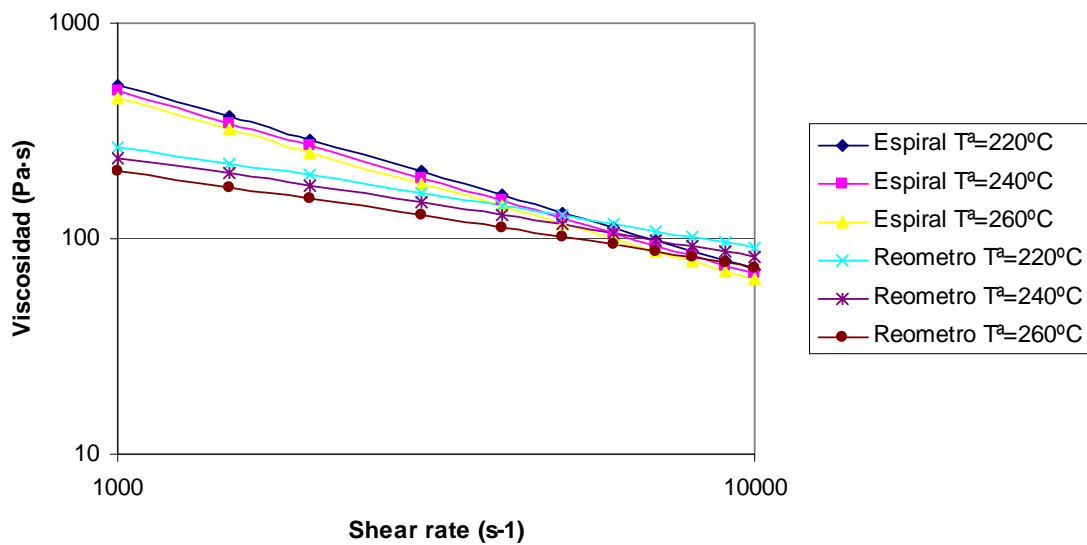
MATERIAL VIRGEN

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



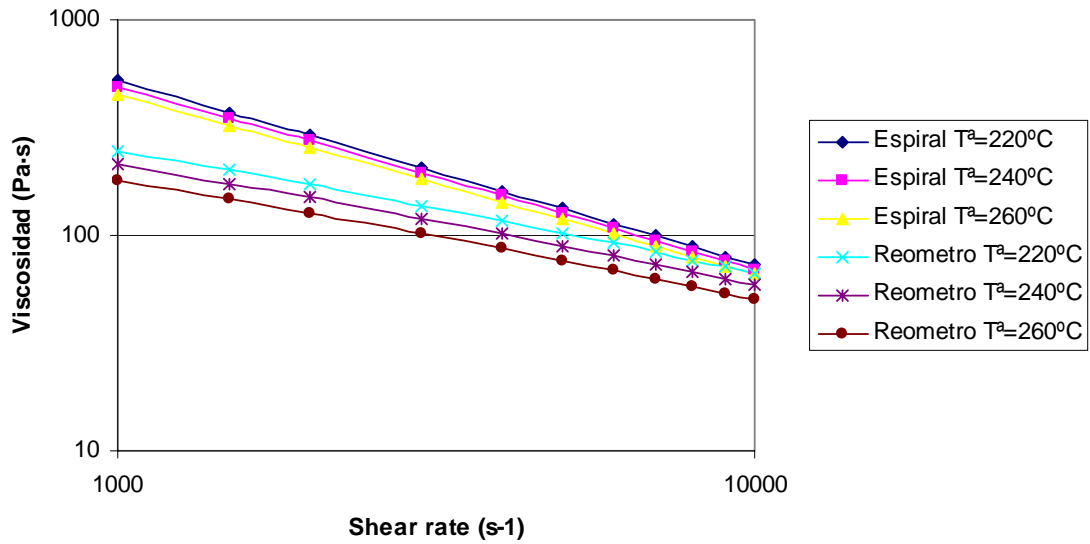
MATERIAL 20% RECICLADO

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



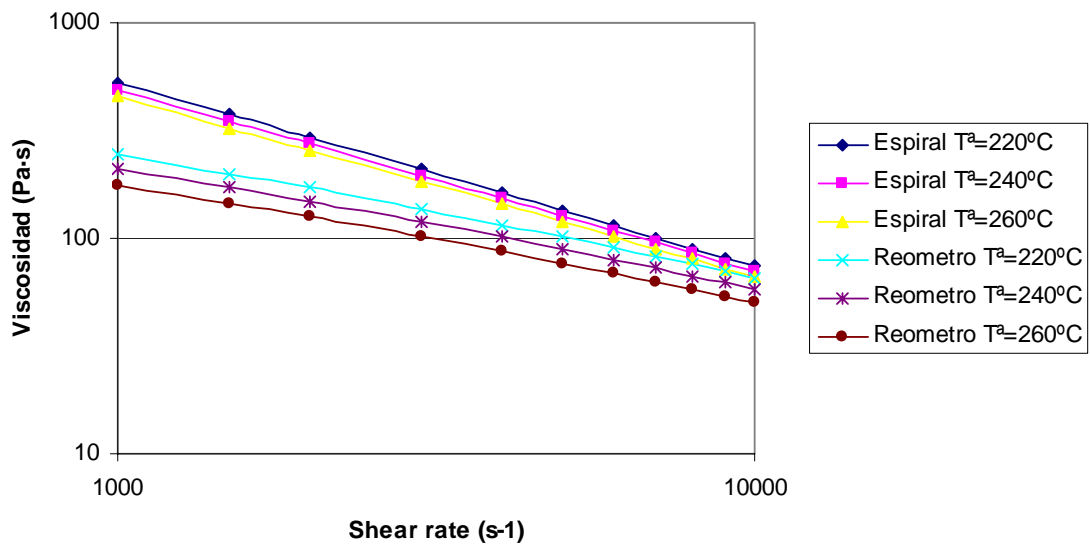
MATERIAL 40% RECICLADO

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



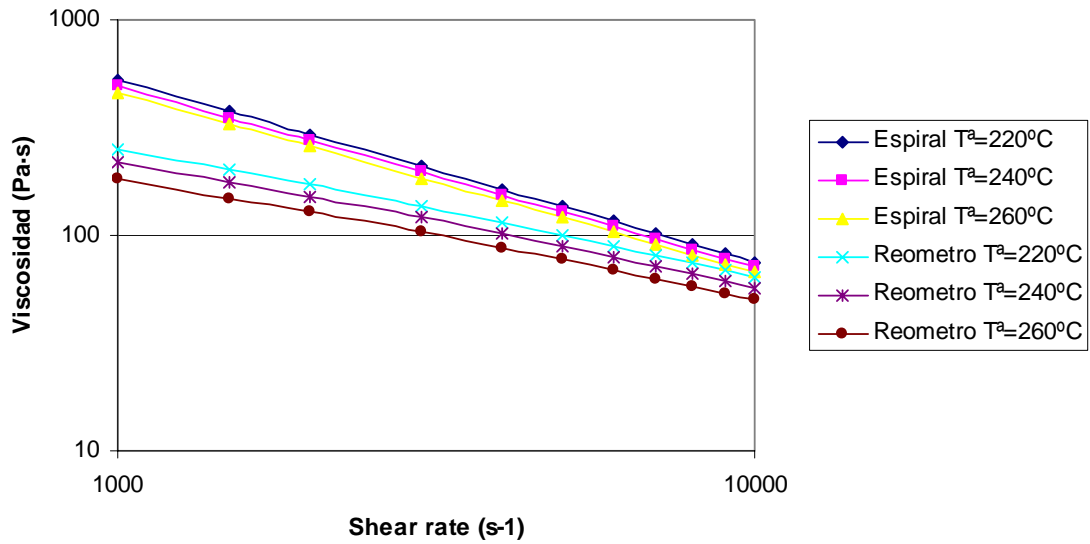
MATERIAL 60% RECICLADO

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



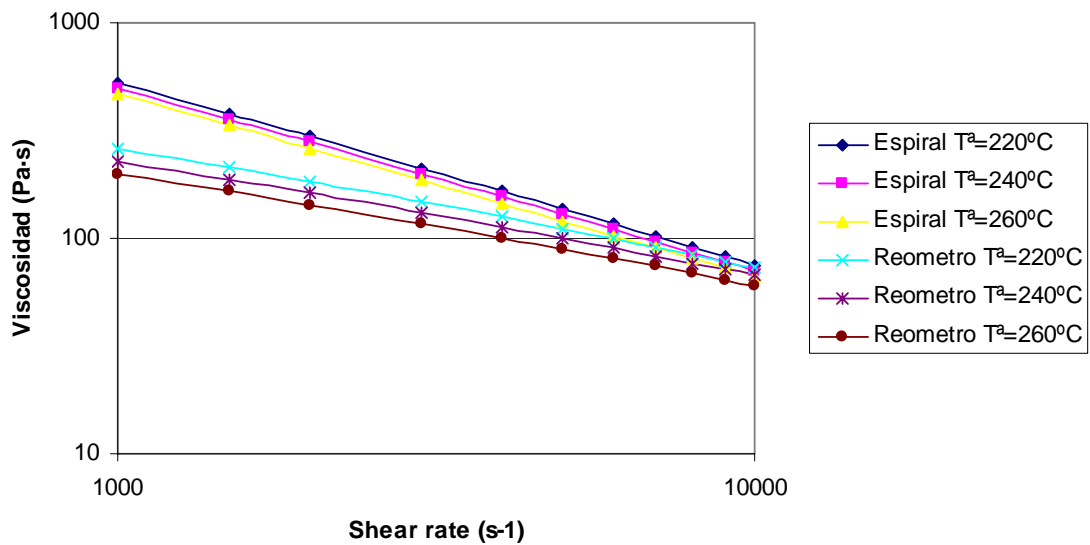
MATERIAL 80% RECICLADO

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



MATERIAL 100% RECICLADO

COMPARACIÓN CURVAS DE VISCOSIDAD ESPIRAL - REÓMETRO



Tras el análisis de las gráficas anteriores donde se observan las curvas de viscosidad para los distintos materiales analizados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los valores de viscosidad obtenidos con el molde espiral son ligeramente superiores a los obtenidos con el reómetro capilar.
- Esta diferencia de valores no es uniforme para todos los shear rate, se aprecia una diferencia mayor en shear rate bajos, y se tiende a valores más similares en shear rates mayores. Esto sobre las graficas se aprecia analizando la diferencia de inclinación de las curvas obtenidas con uno y otro método.
- Las diferencias entre ambos métodos tienden a ser más pequeñas en rangos de shear rate usuales para el material en el proceso de inyección.
- El reómetros es más sensible a la influencia de la temperatura del material que el molde espiral.

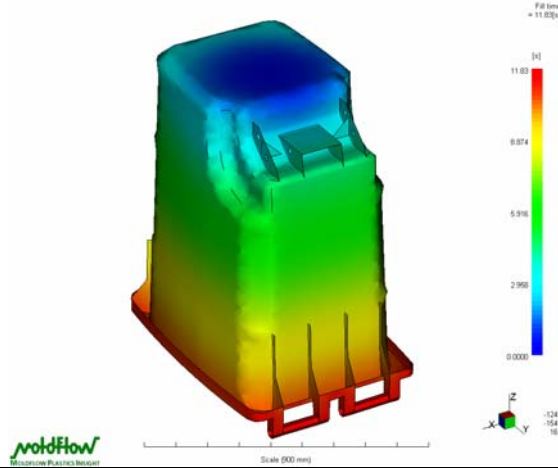
Simulación de inyección

Se realiza la simulación del cubo de 340 L de Contenur, el mismo molde que se ha utilizado en el apartado 5.1.2.4. “Aplicación a los programas de simulación”, pero utilizando el modelo viscoso obtenido con el reómetro capilar para el material virgen y con el disponible en la base de datos del programa de simulación.

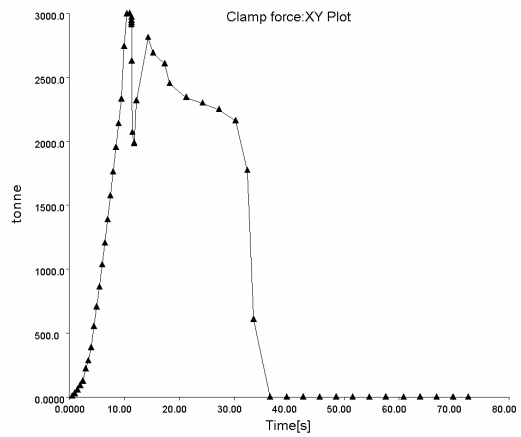
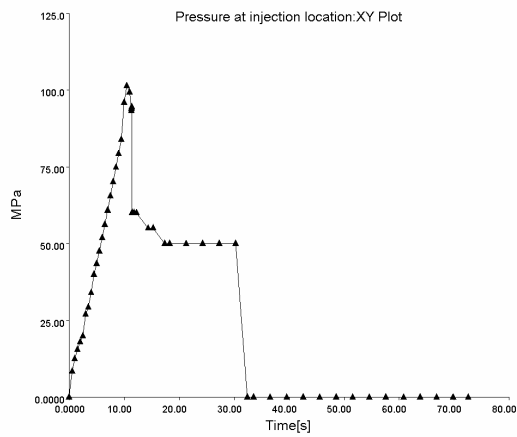
Los parámetros de proceso son los mismos que los utilizados en el apartado anterior, con el objetivo de que los resultados que se obtengan de las simulaciones de inyección sean comparables con los de la simulación con el modelo viscoso equivalente obtenido con el método de caracterización desarrollado.

<u>CONDICIONES DEL PROCESO</u>	
MATERIALES	SABIC HDPE M40060S Con 20, 40, 60, 80 y 100% del mismo material reciclado
Tª DE INYECCIÓN	240° C
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
Tª DE REFRIGERACIÓN	40 °C
TIEMPO DE INYECCIÓN	10 s
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	
CAMBIO DE FASE	97% del volumen de llenado
TIEMPO DE COMPACTACIÓN	20 s.
PROGRAMACIÓN DE PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	

MATERIAL BASE DE DATOS

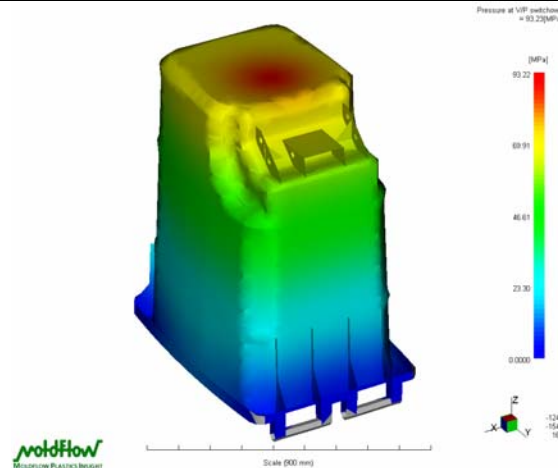


Evolución de llenado



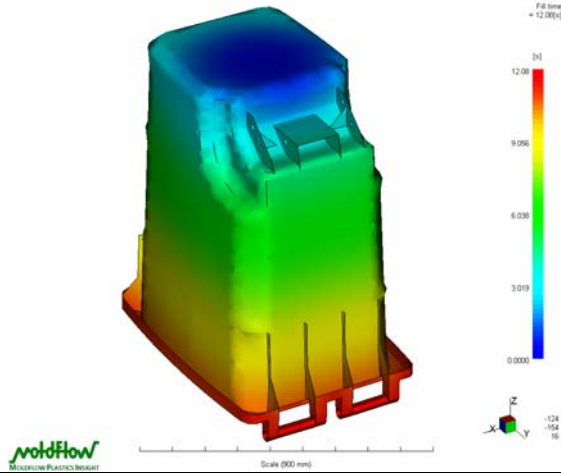
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 93 MPa.

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3000 Ton

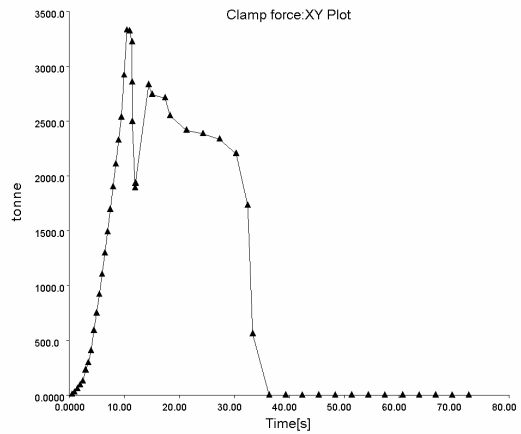
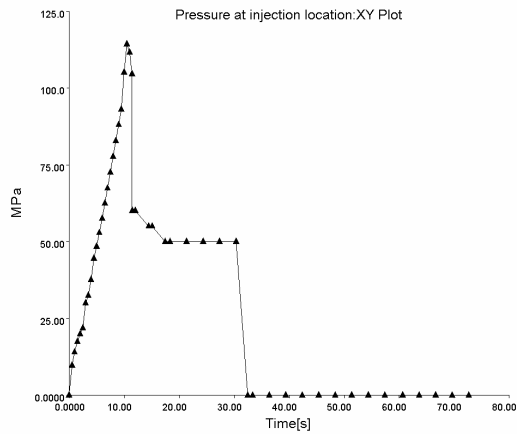


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL REÓMETRO CAPILAR

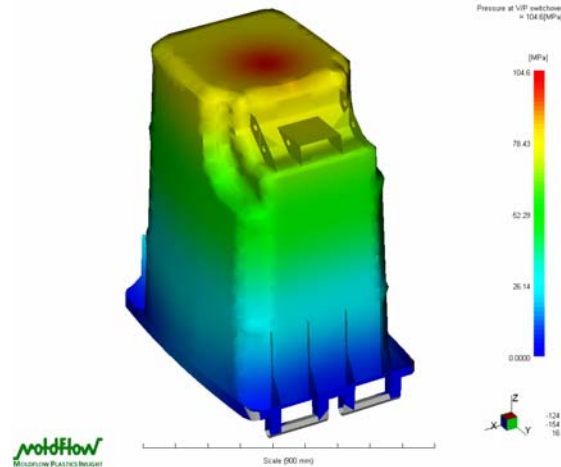


Evolución de llenado



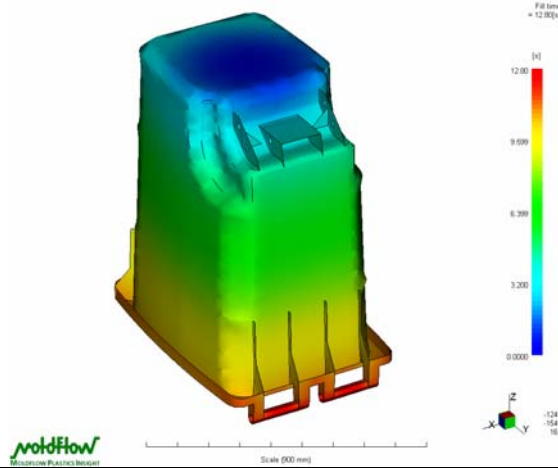
Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 104 MPa.

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3320 Ton

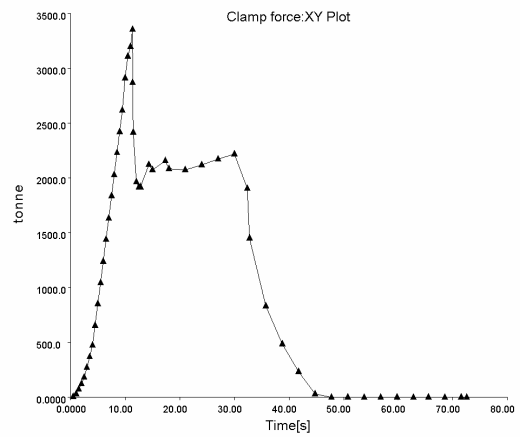
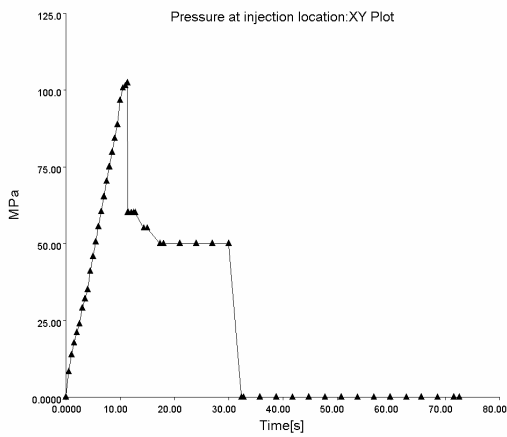


Distribución de la presión al final del llenado.

MATERIAL VIRGEN

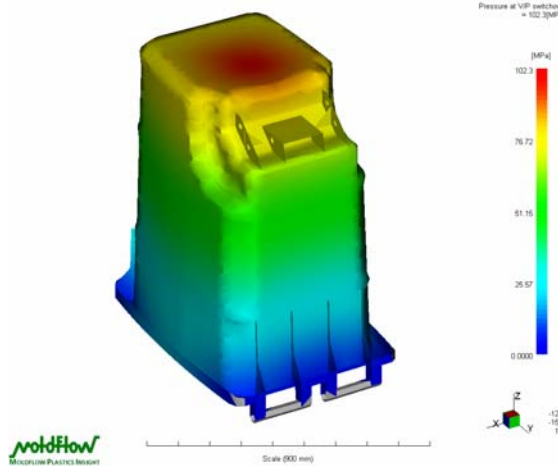


Evolución de llenado



Evolución de la presión.
P máx. durante el llenado = 102 MPa

Evolución de la fuerza de cierre.
F máx. durante el llenado = 3350 Ton

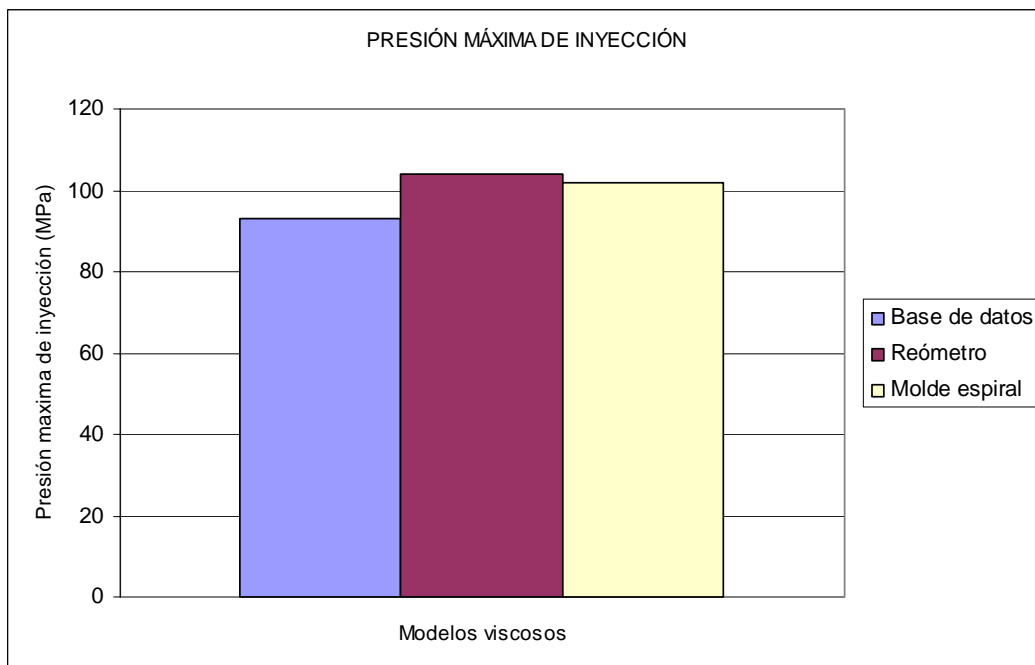


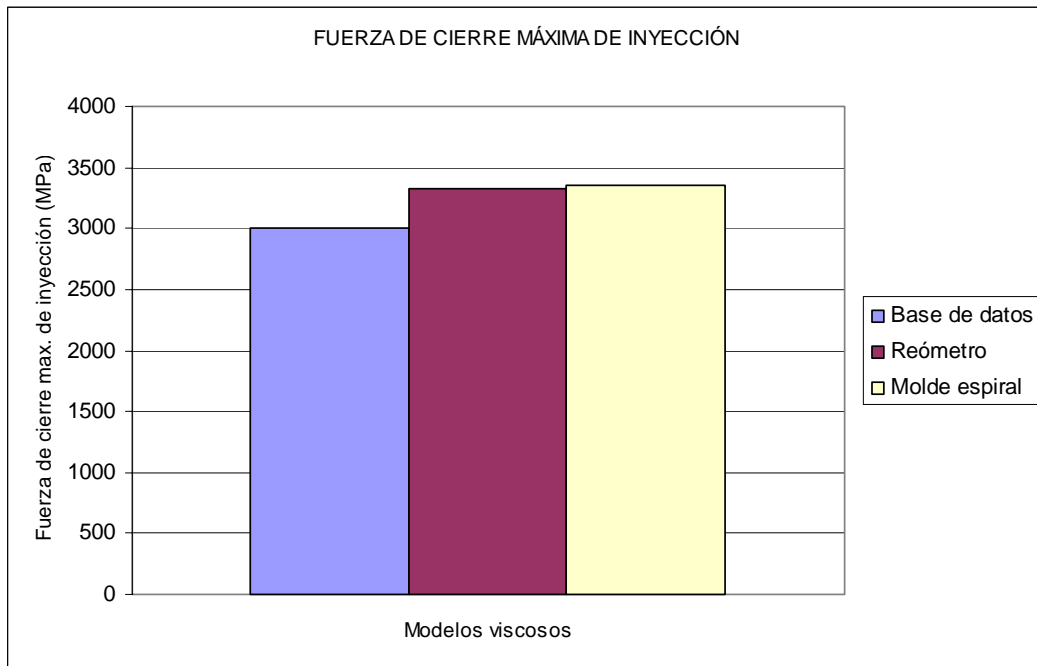
Distribución de la presión al final del llenado.

Los resultados numéricos obtenidos de todos los casos comparables entre si, que han sido simulados, se recogen en la siguiente tabla:

RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Modelo viscoso	Tiempo de llenado (s)	Presión máx. (MPa)	Fuerza de cierre máx. (Ton)
Base de datos	11.8	93	3000
Reómetro	12	104	3320
Molde espiral	12.8	102	3350

A continuación se representa en gráficas comparativas los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones de inyección realizadas:





En la tabla y en gráficas comparativas se observa que los resultados obtenidos con el modelo viscoso obtenido con el reómetro capilar y el modelo viscoso equivalente obtenido con el molde espiral son muy similares, y que la diferencia entre los resultados apenas es de un 1,7%.

Si se comparan los resultados obtenidos con el reómetro capilar y con el molde espiral con los resultados obtenidos con el modelo viscoso de la base de datos, las diferencias para ambos modelos viscosos varían entre un 9 y un 10%.

De forma paralela, y gracias a las buenas relaciones que se mantiene entre el T.I.I.P. (Taller de Inyección de la Industria del Plástico, dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica del C.P.S. Universidad de Zaragoza) y el “Laboratoire de Physico-chimie des polymeres” de la Universidad de Pau, se cuenta, gracias a su colaboración, con el análisis del material virgen y 100% reciclado utilizado en el análisis mediante el método de caracterización desarrollado, en un reómetro de placas.



Fig. Material reciclado y material virgen analizado en el reómetro de placas.



Fig. Reómetro de placas de 25mm.

Los ensayos se realizan a temperaturas y shear rate inferiores a los que se utilizan en el proceso de inyección de plástico y por lo tanto, inferiores a las temperaturas y shear rate que con nuestro método de caracterización desarrollado hemos analizado las distintas mezclas de materiales.

En la siguiente imagen se recogen las curvas de viscosidad obtenidas para los dos materiales analizados a 180° C.

Se comprueba que la tendencia observada en los dos métodos de análisis utilizados, de que los valores de viscosidad equivalente calculados sean mayores para el material reciclado que para el material virgen, también se observan cuando los materiales son analizados con un reómetro de placas a temperaturas y shear rate de análisis inferiores.

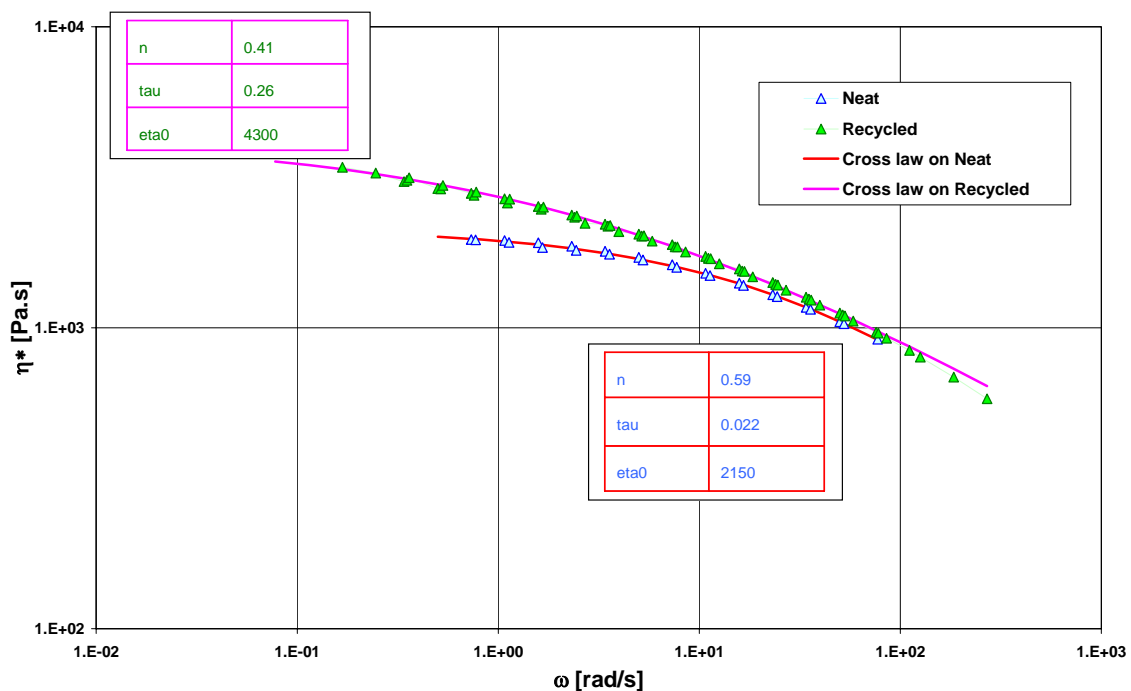


Fig. Gráfica de la curva de viscosidad obtenida para el material virgen y para el material reciclado a 180° C.

5.2.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL RECICLADO

Como se ha demostrado, la introducción de diferentes porcentajes de material reciclado afecta al comportamiento reológico del material.

Además de las propiedades reológicas se han realizado numerosos estudios de cómo otras propiedades se ven afectadas al introducir porcentajes de material reciclado. De cara al diseño funcional de piezas de plástico inyectadas es muy importante tener caracterizado el comportamiento mecánico del material y sobre todo, dentro de las propiedades mecánicas destacan principalmente; la importancia del Modulo Elástico de cara a prever deformaciones de las piezas bajo carga, y la tensión de rotura de cara a establecer de forma correcta los factores de seguridad en el diseño. El módulo Elástico es además un dato del material que es utilizado por los programas de simulación para el cálculo de las deformaciones y por tanto será útil para el cálculo de las mismas si se tiene el este valor cuando se esté utilizando material reciclado.

En este apartado del trabajo se ha pretendido analizar la forma en que varían las principales propiedades mecánicas de un polietileno de alta densidad utilizado en la fabricación de contenedores al adicionarle porcentajes del mismo material reciclado.

A pesar de que el análisis mecánico del material plástico estudiado en esta tesis, no es un objetivo principal de la misma, si se ha considerado interesante analizar la influencia del porcentaje de reciclado en este material en propiedades mecánicas, básicas de cara a tener una idea cualitativa del efecto del material reciclado en otros aspectos fundamentales para el diseño y no solo en el aspecto reológico.

El objetivo en este apartado es analizar la influencia que tiene el porcentaje de reciclado en las principales propiedades mecánicas de un PEHD, “*SABIC HDPE M40060S*”, obtenidas a través de ensayo de tracción.

Para la elaboración de este análisis se han seguido los siguientes pasos:

1. Inyección de probetas de tracción con diversos porcentajes de material reciclado (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%).
2. Ensayos de tracción de las diferentes probetas, realizados en una máquina de ensayos universales en la nave 5 de Ingeniería Mecánica situada en la E.U.I.T.I.Z.
3. Cálculo de las propiedades mecánicas, modulo elástico y tensión de rotura principalmente para los diferentes porcentajes de reciclado.
4. Análisis de los resultados obtenidos.
5. Análisis por elementos finitos de piezas representativas de contenedor de basura, fabricadas con el PEAD con los diversos porcentajes de reciclado y sometidas a cargas que simulan aproximadamente las situaciones más desfavorables en que trabajan. Para cada caso, se obtienen y estudian las tensiones, deformaciones y desplazamientos.
Este análisis se ha realizado con el programa informático de elementos finitos Cosmos, partiendo de los modelos de las piezas diseñados con el programa ProEngineer, y aplicando los resultados obtenidos en los ensayos del material
6. Conclusiones finales.

PRESENTACIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO.

El material que se ha utilizado para este estudio el polietileno de alta densidad utilizado para fabricar contenedores de basura denominado SABIC HDPE M40060S, que es suministrado por SABIC Polyethylenes B.V. Se dispone de este material tanto virgen como reciclado (mediante un proceso de molido).

Las propiedades del SABIC HPDE M40060S a tener en cuenta en este proyecto y para las cuales se dispone de datos proporcionados por el fabricante son:

PROPIEDAD	VALOR
Propiedad del polimero	
Índice de fluidez (190°,2.16Kg.)	4.0 gr/10min
Densidad	
Propiedades mecánicas	
Tensión a fluencia (vel. de ensayo =50 mm/min)	33 MPa
Tensión a rotura (vel. de ensayo =50 mm/min)	22 MPa
Deformación a rotura (vel. de ensayo =50 mm/min)	1200 %
Modulo de Elasticidad (vel. de ensayo =50 mm/min)	1240 MPa
Impacto Izod con entalla a 23°C	69 J/m
Dureza Shore D	69
ESCR (100% Igepal), F50	6 h
Propiedades térmicas	
Temperatura Vicat a 10 N	128° C
Temperatura fragilidad	< -75 °C

PRUEBAS DE INYECCION DE LAS PROBETAS

El molde utilizado para la inyección se muestra en la siguiente figura. Este molde del TIIP dispone de dos improntas, una de ellas corresponde a la probeta para el ensayo de tracción en la que la entrada del material está situada en uno de los extremos para que en la zona de tracción el material este orientado en las mejores condiciones.

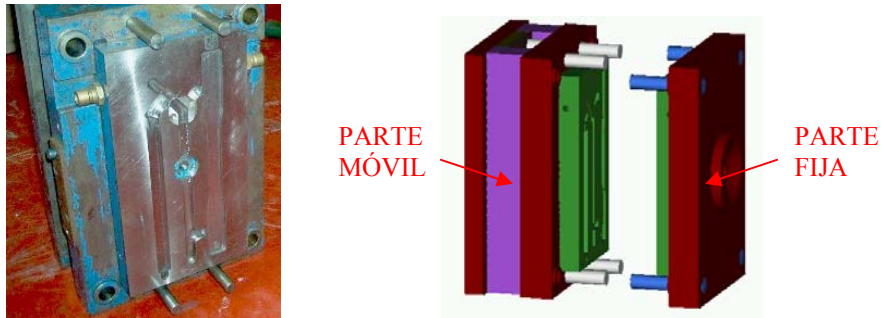


Fig. Molde utilizado para la inyección de material (imagen a la izquierda) y un esquema del molde en ProEngineer (imagen a la derecha)

La inyección se ha realizado en una máquina de inyección eléctrica JSW J85 ELII ubicada en A.I.T.I.P (Asociación de Investigación Taller de Inyección de la Industria de los Plásticos). Al ser la misma que la utilizada en la inyección del molde espiral del apartado 5 sus características aparecen reflejadas en dicho apartado.

Las probetas que se consideraron necesarias para realizar este estudio cumplen los siguientes aspectos:

- Inyección de probetas tomando porcentajes de reciclado en intervalos de 20 y 20, es decir: 0% (material virgen), 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Dicha escala es lo suficientemente representativa para llevar a cabo el estudio posterior objeto de este análisis.

- Inyección de 10 probetas para cada uno de esos porcentajes de material reciclado. De esta forma, se disponen de probetas suficientes para realizar los ensayos de tracción posteriores.
- Inyección de varias probetas adicionales de prueba. Ello permite realizar un ensayo de tracción previo sobre algunas, pudiendo de esta manera ajustar la máquina de ensayos y comprobar su correcto funcionamiento

Para realizar la inyección de las probetas el primer paso es colocar y ajustar el molde en la máquina de inyección con la ayuda de un puente grúa tal como se observa en las siguientes imágenes.



Fig. Molde colocado en la máquina de inyección (imagen a la izquierda) y detalle ampliado del molde en la máquina (imagen a la derecha)

A continuación, se prepara cada una de las muestras de PEHD con un porcentaje de reciclado. Para obtener cada uno de estos porcentajes se ha mezclado el PEHD virgen con el reciclado en un recipiente, pesándolos previamente por separado en una balanza para determinar las proporciones de la mezcla en base a 10 Kg., tal como se observa en la siguiente tabla:

Porcentaje (%)	PEHD virgen (Kg.)	PEHD reciclado (Kg.)	TOTAL (Kg.)
0	10	0	10
20	8	2	10
40	6	4	10
60	4	6	10
80	2	8	10
100	0	10	10

Tabla: Composición de las probetas en Kg.

Como se ha indicado anteriormente, se han inyectado 10 probetas para cada una de las 6 muestras de porcentaje de reciclado (en total 60 probetas).

Las condiciones de inyección de las probetas han sido las siguientes:

Temperatura de inyección	240 °C
Velocidad de inyección	23mm/s
Presión de inyección	400 bar.

Tabla: Condiciones de inyección

En las siguientes imágenes se muestran, como ejemplo, una probeta de material virgen y otra de material 100 % reciclado:

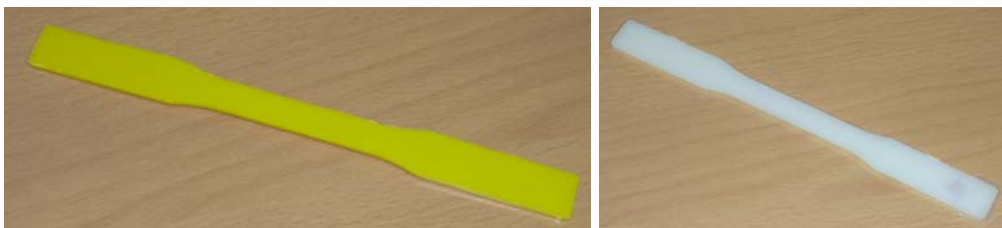


Fig. Probeta de material 100 % reciclado (imagen izquierda) y virgen (imagen derecha)

Una vez inyectadas las probetas se procedió a una eliminación de las rebabas para garantizar las dimensiones y uniformidad de forma de la sección.

ENSAYOS DE TRACCIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

Máquina de ensayos.

Los ensayos se realizaron en la nave 5 del Departamento de Ingeniería Mecánica ubicada en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza (E.U.I.T.I.Z.). Se ha utilizado una máquina de ensayos universales modelo Instron 8032. En la figura siguiente puede observarse esta máquina:



Fig. Máquina de ensayos universales Instron 8032

Descripción de los ensayos.

Probetas. Dimensiones.

Las probetas de ensayo tienen forma halterio 1ª, como marca la norma UNE-EN ISO 527, para probetas inyectadas por moldeo. A continuación se muestra la parametrización de la probeta de ensayo.

Se han tomado medidas geométricas para 3 probetas de cada muestra de porcentaje de reciclado utilizando un calibre. La variación en estas cotas en las probetas ensayadas es insignificante, para la realización de los cálculos posteriores se realizó una toma de medida de las probetas a ensayar y se realizó la media sobre las mismas. Una muestra de estas medidas pueden verse en la siguiente tabla.

	L1	L2	L3	L4	L5	Espesor
Virgen (1)	68,3	97	211.8	18.7	13	3
Virgen (2)	68,3	97	211.8	18.4	13	3
Virgen (3)	68,3	97	211.8	18.4	13	3
Virgen (media)	68,3	97	211.8	18.5	13	3
20% (1)	68,4	97,2	211.8	18.4	13	3
20% (2)	68,4	97	211.8	18.4	13	3
20% (3)	68,4	97	211.8	18.4	13	3
20% (media)	68,4	97,06	211.8	18.4	13	3
40% (media)	68,4	97,3	211.66	18.46	13	3
60% (media)	68,2	96,93	211.73	18.5	13	3
8% (media)	68,05	96,65	211.8	18.55	13	3
100% (media)	68,4	97,46	211.6	18.5	13	3

Para los cálculos posteriores se necesitan 2 valores:

$$\text{Área de la probeta} = (L5) \times (\text{Espesor}) = 39 \text{ mm}^2$$

$$\text{Longitud inicial de probeta} = L2 = 97\text{mm}$$

Propiedades a determinar.

La norma UNE-EN 527-1:1996 establece las propiedades que se pueden determinar mediante ensayo de tracción:

- *Módulo de elasticidad en tracción, módulo elástico ó módulo de Young (MPa):* constante de proporcionalidad que relaciona la tensión con la deformación.
- *Resistencia a la tracción (MPa):* esfuerzo máximo en tracción soportado por la probeta durante el ensayo de tracción.
- *Deformación en la resistencia a la tracción (%):* deformación por tracción que corresponde al valor de la resistencia a la tracción.
- *Esfuerzo de fluencia (MPa):* primer esfuerzo para el cual tiene lugar un aumento de la deformación sin aumentar el esfuerzo.
- *Deformación por tracción en el punto de fluencia (%):* deformación por tracción que corresponde al valor del esfuerzo de fluencia.
- *Resistencia a la tracción en el punto de rotura (MPa):* esfuerzo de tracción soportado en el momento de rotura de la probeta.
- *Deformación nominal en el punto de rotura por tracción (%):* deformación por tracción que corresponde al valor del esfuerzo de tracción en el punto de rotura.

Hay que tener en cuenta que la máquina de tracción utilizada solo permite deformaciones máximas hasta valores cercanos al 100 % y el material ensayado puede deformar hasta valores muy superiores a 100 % (en torno a 1200 %). En consecuencia, no se ha podido obtener la deformación en el punto de rotura ni su correspondiente valor de esfuerzo al no poder alcanzar este punto (se ha comprobado que en ninguno de los ensayos ha ocurrido la rotura de la probeta)

Condiciones de ensayo.

Las condiciones de ensayo están determinadas por las normas UNE-EN ISO 1872-2 para polietileno y UNE 53978 para polietileno reciclado. Estas normas marcan las siguientes velocidades de ensayo, tanto para material virgen como reciclado:

VELOCIDAD DE ENSAYO	
Módulo de elasticidad en tracción	1 mm/min
Resistencia a tracción y su correspondiente deformación	50 mm/min
Esfuerzo de fluencia y su correspondiente deformación	50 mm/min

Tabla. Resultados de los ensayos de tracción según condiciones del fabricante y norma

Se ensayaron previamente 2 probetas de prueba inyectadas con material virgen utilizando las condiciones que marca la norma. Los valores de las propiedades calculados a partir de estos ensayos han resultado ser similares a los valores proporcionados por el fabricante, excepto el módulo de elasticidad, el cual ha presentado unos valores mucho más bajos, en torno a 500MPa. Este valor no se aleja de forma notable del valor proporcionado por el fabricante (en torno a 1000MPa). Tras varios ensayos se consiguieron valores semejantes a los teóricos facilitados por el fabricante de material realizando los ensayos a una velocidad mayor (50mm/min.), distinta a la marcada por la norma lo que a partir de ahora denominaremos condiciones de fabricante

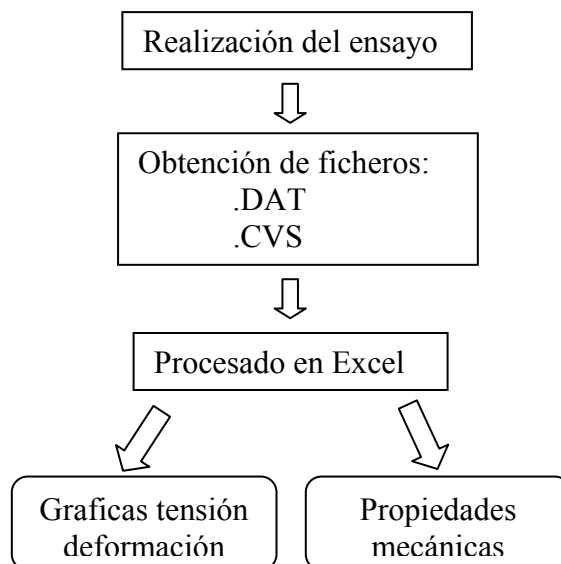
Debido a lo explicado anteriormente, se decidió calcular el modulo elástico del PEHD ensayado utilizando tanto las condiciones que marca la normativa como la velocidad de 50mm/min., en la que se obtienen valores de modulo elástico próximos a los teóricos. De esta manera, se puede comprobar si las propiedades varían con el porcentaje de reciclado de la misma forma independientemente de las condiciones de ensayo utilizadas.

Se han tomado un total de 6 probetas de las 10 que han sido inyectadas para cada porcentaje de reciclado y se han ensayado de la siguiente forma:

- Ensayo de 3 probetas según condiciones marcadas por la normativa: velocidad de 1 mm/min durante los primeros 5 minutos (para determinar el módulo de elasticidad) y a velocidad 50 mm/min durante el resto de tiempo hasta el final del ensayo (para determinar el resto de propiedades).
- Ensayo de 3 probetas según condiciones utilizadas por el fabricante: velocidad de 50 mm/min durante todo el ensayo (para determinar todas las propiedades).

Resultados de los ensayos.

Tras la realización de los ensayos se realiza un proceso de tratamiento de datos. El proceso se ve reflejado de forma resumida en el siguiente esquema.



Los ficheros que se obtienen de los ensayos son de dos tipos .DAT y .CSV. Los archivos .DAT guardan cada 0.01 segundos de tiempo de ensayo los siguientes datos:

- Time (segundos): indica el instante de tiempo.
- Posición (mm): indica la posición relativa de la mordaza móvil (que sujeta el extremo inferior de la probeta) respecto a un punto situado en la mitad del recorrido total de dicha mordaza.
- Carga (KN): indica la fuerza que ejerce la máquina sobre la probeta.
- Cycle: indica el ciclo de tiempo. Cada segundo equivale a un ciclo completo, por lo tanto, como los datos se guardan cada 0,01 segundos, habrá 100 datos para cada ciclo.

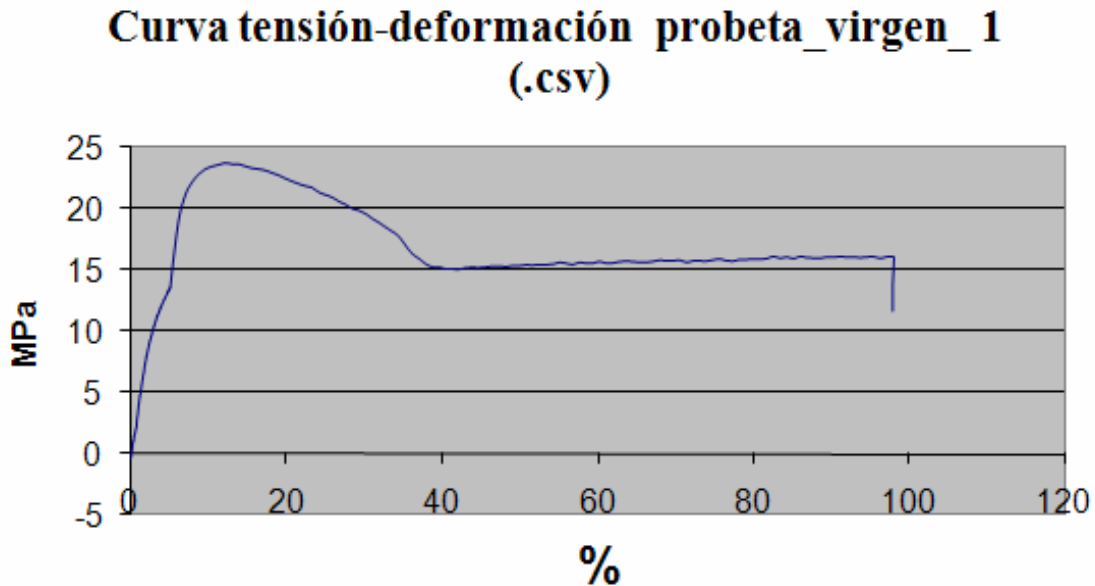
Los ficheros .CSV: guardan cada segundo los valores máximos y mínimos guardados en el correspondiente .DAT de la siguiente forma:

- Cycle: indica el ciclo de tiempo.
- Posición_MAX (mm): indica el valor máximo de todos los valores de la posición guardados en el archivo .DAT para ese ciclo concreto.
- Posición_MIN (mm): indica el valor mínimo de todos los valores de la posición guardados en el archivo .DAT para ese ciclo concreto.
- Carga_MAX (KN): indica el valor máximo de todos los valores de carga guardados en el archivo .DAT para ese ciclo.
- Carga_MIN (KN): indica el valor mínimo de todos los valores de carga guardados en el archivo .DAT para ese ciclo.

Estos ficheros son importados a un fichero EXCEL y a partir de ellos se obtienen los valores de tensión y deformación a lo largo del ensayo aplicando las siguientes expresiones:

- Tensión (MPa) = $(\text{Carga}) \times 1000 / \text{Área de la probeta}$.
- Deformación (%) = $\text{Desplazamiento} \times 100 / \text{Longitud inicial}$.

Un ejemplo de estos valores representados de forma gráfica aparece en la siguiente figura:



A partir de los valores y gráficas ya en ficheros EXCEL se calculan para cada ensayo las siguientes propiedades mecánicas:

1. Modulo de elasticidad a tracción, módulo elástico o módulo de Young(E)
2. Resistencia a tracción (σ_M)
3. Deformación en la resistencia a tracción (ϵ_M)
4. Esfuerzo a fluencia (σ_y)
5. Deformación a la tracción en el punto de fluencia (ϵ_y)

En la siguiente curva tensión-deformación, característica de un material dúctil, aparecen representadas estas propiedades así como las diferentes zonas de comportamiento mecánico del material durante la tracción.

- Zona A: Zona que corresponde al comportamiento elástico lineal del material en tracción, en el cual la deformación es elástica, es decir, desaparece cuando se retira la carga que produce la tracción de la probeta. La curva es aproximadamente una línea recta, siendo la deformación directamente proporcional a la tensión. La constante de proporcionalidad es el módulo de elasticidad.
- Zona B: Zona que corresponde al comportamiento elástico no lineal del material en tracción. La deformación es plástica y ya no se recupera al desaparecer la carga de tracción sino que es permanente. Esta deformación no es directamente proporcional a la tensión.
- Zona C: Zona a partir de la cual ocurre el fenómeno de la fluencia.

➤ El Módulo Elástico a tracción se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

El módulo elástico se ha calculado, según lo explicado anteriormente, de dos formas diferentes;

- Según norma UNE-EN ISO 527-1
 σ_1 : Esfuerzo en MPA en deformación $\varepsilon_1=0.0005$ (0.05%)
 σ_2 : Esfuerzo en MPA en deformación $\varepsilon_2=0.0025$ (0.25%)
- Según las condiciones denominadas “condiciones de fabricante”
 σ_1 : 0 MPA
 σ_2 : Esfuerzo en MPA en deformación $\varepsilon_2=0.01$ (1 %)

- Resistencia a tracción y su correspondiente deformación: Se toma el máximo valor de todas las tensiones obtenidas y su valor correspondiente de deformación.
- Esfuerzo de fluencia y su correspondiente deformación: Se toma el primer valor aproximado de tensión a partir del cual no hay aumento de tensión conforme aumenta la deformación. También se toma su valor correspondiente a la deformación.

En la tabla de resultados a continuación se muestra, para cada propiedad, el valor obtenido según las condiciones del fabricante (F) y el obtenido según las condiciones de la norma (N)

		Módulo de elasticidad en tracción (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación en la resistencia a la tracción (%)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Deformación por tracción en el punto de fluencia (%)
Virgen (0 %)	F	1334,69	24,50	11,68	24,35	9,43
	N	472,56	23,78	12,46	23,59	10,65
20 %	F	1220,65	23,23	12,33	23,14	10,61
	N	279,96	23,13	12,08	22,90	10,92
40 %	F	1117,20	23	11,46	22,81	9,74
	N	125,76	22,06	13,32	21,98	12,17
60 %	F	1103,21	21,95	13,46	21,80	11,15
	N	125,34	21,18	13,17	20,94	12,29
80 %	F	838,50	21,05	13,77	20,89	11,19
	N	104,83	20,10	14,16	20,02	12,29
100 %	F	849,60	19,74	13,75	19,62	12,03
	N	87,25	19,51	15,72	19,35	12,32

Tabla. Resultados de los ensayos de tracción según condiciones del fabricante y norma

Análisis de los resultados.

A continuación se muestran las gráficas de la variación de las principales propiedades mecánicas según el porcentaje de reciclado:

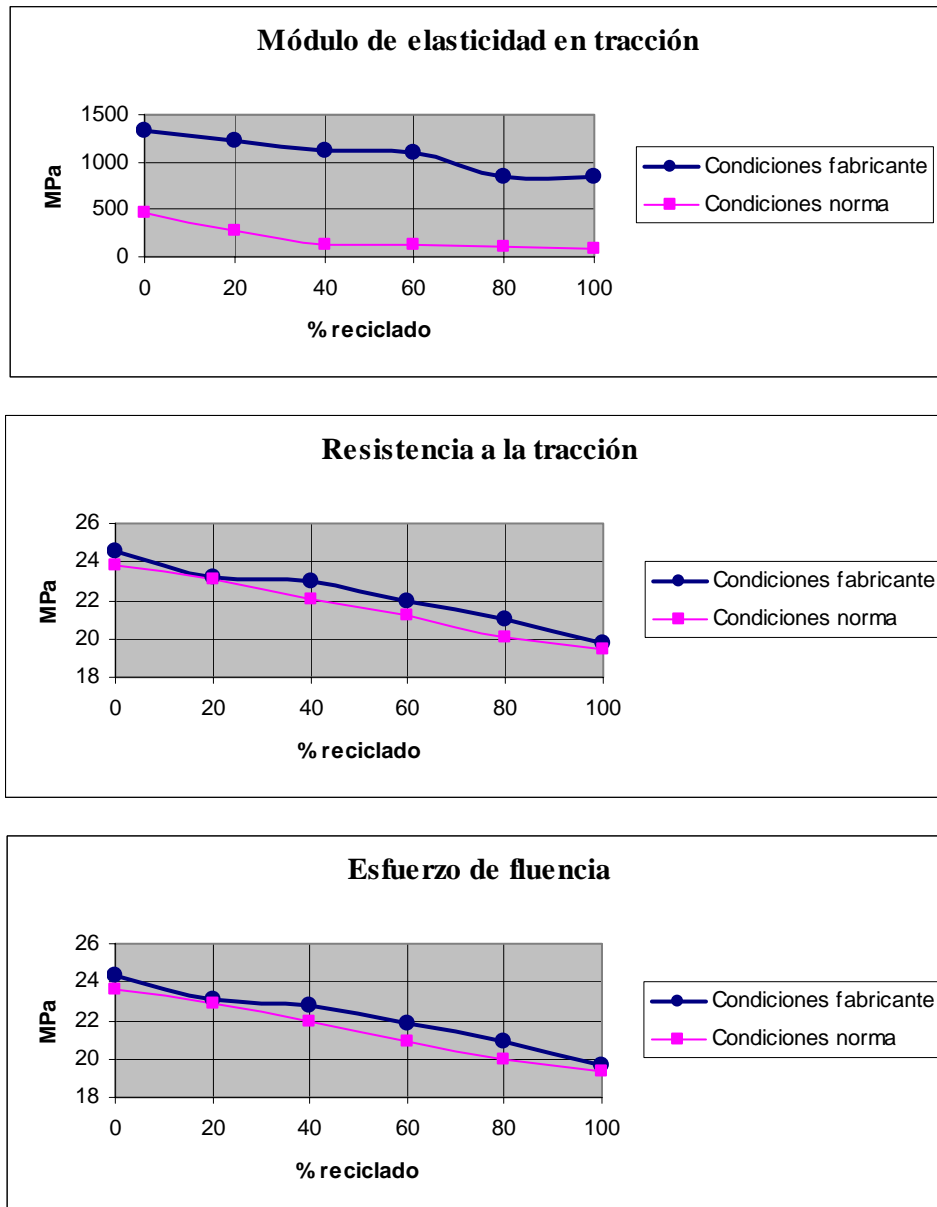


Fig. Módulo de elasticidad en tracción, resistencia a la tracción y esfuerzo de fluencia en función del % reciclado

Analizando las gráficas y las tablas de resultados se observa lo siguiente:

AUMENTO DE 0 A 100 % RECICLADO		
	Condiciones fabricante	Condiciones norma
Módulo de elasticidad en tracción	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuye en torno a un 40 %, con una tendencia aproximadamente lineal. - Mayor disminución: se da para 0-40 y 60-80 % de reciclado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuye con una tendencia aproximadamente lineal. - Mayor disminución: se da para 0-40 % de reciclado.
Resistencia a la tracción	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuyen en torno a un 20 %, con una tendencia lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuyen en torno a un 20 %, con una tendencia lineal.
Esfuerzo de fluencia		
Deformación en la resistencia a la tracción	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentan muy ligeramente, en torno a un 2 %. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentan muy ligeramente, en torno a un 2 %.
Deformación por tracción en el punto de fluencia		

Tabla. Análisis de resultados de los ensayos de tracción

ANALISIS DE LAS PIEZAS DE CONTENEDOR DE BASURA FABRICADAS CON EL MATERIAL ENSAYADO

Una vez analizada la influencia de la introducción de diferentes porcentajes de material reciclado sobre las principales propiedades mecánicas se va a analizar la influencia cuantitativa que tendría la reutilización del material reciclado sobre diferentes productos fabricados actualmente con el material en estudio. Se han seleccionado tres piezas representativas pertenecientes a contenedores de basura sobre las que se ha realizado el estudio que se presenta a continuación.

Presentación de las piezas.

A continuación se presentan las diversas piezas de contenedor de basura que se van a estudiar. Se han utilizado los modelos de contenedor que fabrica la empresa Contener:

- Cubo de un contenedor de 120 litros de capacidad (*contenedor 120*).



Fig. Cubo de un contenedor 120 y su modelo diseñado en ProEngineer.

- Tapa de un contenedor de 120 litros de capacidad (*contenedor 120*)



Fig. Tapa de un contenedor 120 y su modelo diseñado en ProEngineer

- Pieza del mecanismo de apertura de la tapa de un contenedor de 2400 litros de capacidad



Fig. Pieza encargada de abrir un contenedor 2400 y su modelo diseñado en ProEngineer

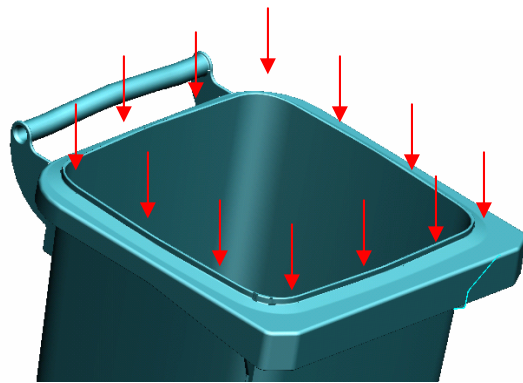
Descripción de los análisis.

En este apartado se resumen las condiciones de contorno y las cargas utilizadas para simular las situaciones de trabajo más desfavorables de cada una de las piezas.

Cubo del contenedor 120L.

Las condiciones de trabajo más desfavorables que se han estimado para este cubo son las siguientes:

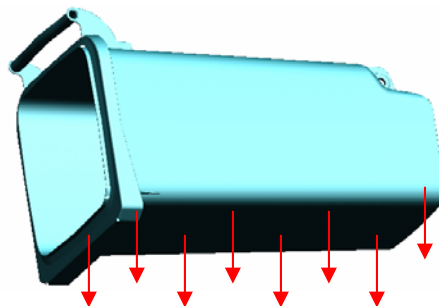
- a) Apilado de cubos durante su almacenaje y transporte:



Fuerza estimada en 700 N:
peso de 7 cubos iguales
(apilados uno encima de
otro sobre el cubo)
distribuido uniformemente
sobre la boca del cubo

Fig. Fuerzas sobre el cubo durante el apilado

- b) Descarga del cubo lleno al máximo de su capacidad:



Fuerza estimada en 580 N: peso
de la basura distribuido
uniformemente en la superficie
de la pared del cubo (480 N) +
peso del cubo (100 N)

Fig. Fuerzas sobre el cubo lleno al máximo de su capacidad durante la descarga

Tapa del contenedor 120L.

La condición de trabajo más desfavorable estimada para esta tapa ha sido con un peso colocada encima de ella:

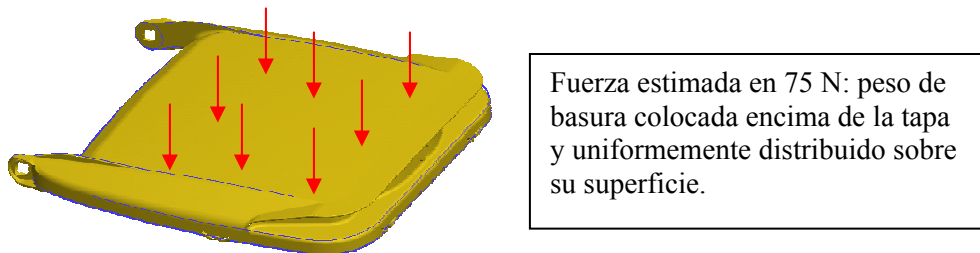


Fig. Fuerza sobre la tapa debida a un peso colocado sobre ella

Pieza encargada de abrir el contenedor de 2400L.

En la figura siguiente se observa la situación de la pieza en el contenedor 2400L:

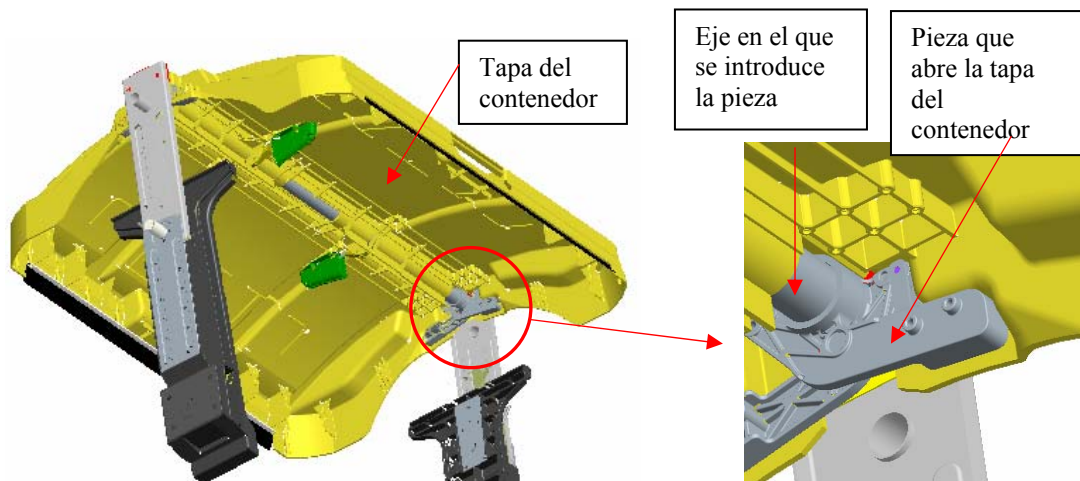


Fig. Situación de la pieza que abre la tapa del contenedor 2400

La condición de trabajo más desfavorable estimada para esta pieza ha sido el empuje que efectúa al abrir la tapa del contenedor cuando se pisa un pedal:

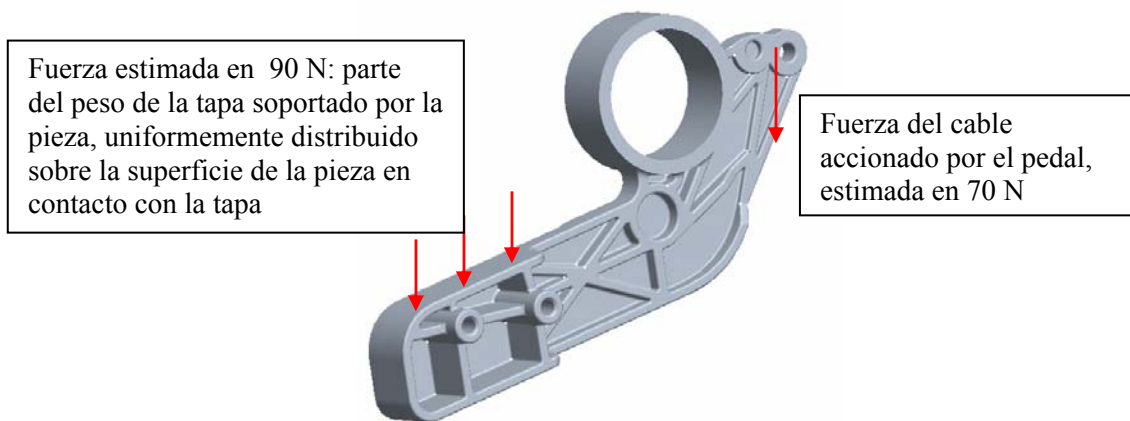


Fig. Fuerzas sobre la pieza debidas al peso de la tapa y la fuerza del cable

Resultados obtenidos en cosmos.

Se han obtenido los siguientes resultados para cada pieza utilizando los diversos porcentajes de reciclado:

- Tensiones, deformaciones y desplazamientos máximos que aparecen debido a las condiciones de trabajo.

- Coeficientes de seguridad =
$$\frac{\text{Resistencia a tracción del material}}{\text{Tensión máxima}}$$

Se han llevado a cabo 2 tipos de análisis en Cosmos para obtener los resultados:

- **Lineal:**

Se considera la aproximación de comportamiento elástico lineal del material, de forma que sólo hay que introducir el valor del módulo de elasticidad correspondiente a cada porcentaje de reciclado.

- **No lineal:**

Se considera que el material tiene comportamiento elástico no lineal. De esta forma, se introducen directamente los valores de las curvas tensión-deformación correspondientes a cada porcentaje de reciclado.

En las tablas a continuación se muestran los valores obtenidos con análisis lineal (L) y con análisis no lineal (NL). Se han realizado los análisis con las propiedades del material obtenidas en los ensayos tanto con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma como con los obtenidos con las condiciones denominadas “según fabricante”. Son estos últimos los que aparecen reflejados a continuación.

Cubo del contenedor 120L.

1) Apilado de cubos:

No se ha podido realizar el análisis no lineal para ningún porcentaje de reciclado ya que el programa daba errores de cálculo continuamente. Los resultados del análisis lineal han sido:

		Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Desplazamiento máximo (mm)	Coefficiente de seguridad
<i>Virgen</i> (0 %)	L	6,76	0,25	0,62	3,62
20 %	L	6,76	0,28	0,69	3,43
40 %	L	6,76	0,4	0,74	3,38
60 %	L	6,76	0,4	0,76	3,25
80 %	L	6,76	0,53	1	3,12
100 %	L	6,76	0,53	1	2,92

Tabla. Resultados para el apilado de cubos.

Las máximas tensiones y deformaciones aparecen en los nervios de la parte superior del cubo y en la superficie que apoya en el eje de las ruedas. Los máximos desplazamientos aparecen en los bordes de la parte superior del cubo. Esto se observa en las siguientes figuras.

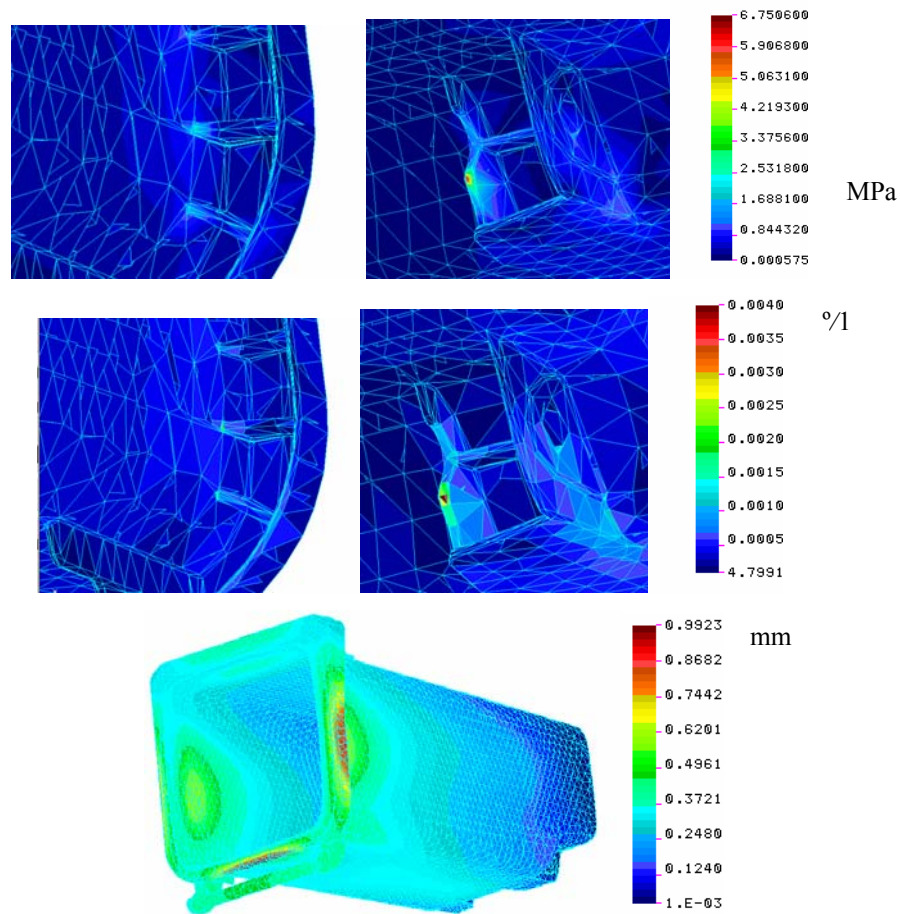


Fig. Distribución de tensiones, deformaciones y desplazamientos para el apilado.

2) Descarga del cubo lleno al máximo de su capacidad:

No se ha podido realizar el análisis no lineal por las mismas razones que en el caso anterior. Los resultados del análisis lineal han sido:

		Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Desplazamiento máximo (mm)	Coefficiente de seguridad
<i>Virgen</i>	L	14,77	0,97	19,90	1,66
20 %	L	14,77	1,07	19,90	1,57
40 %	L	14,77	1,07	23,95	1,55
60 %	L	14,77	1,17	24,50	1,49
80 %	L	14,77	1,58	32,22	1,42
100 %	L	14,77	1,55	32,22	1,34

Tabla. Resultados para el cubo al máximo de su capacidad durante su descarga

Las máximas tensiones y deformaciones aparecen en los nervios de la parte superior del cubo. Los máximos desplazamientos aparecen en la superficie que soporta el peso del contenido del cubo.

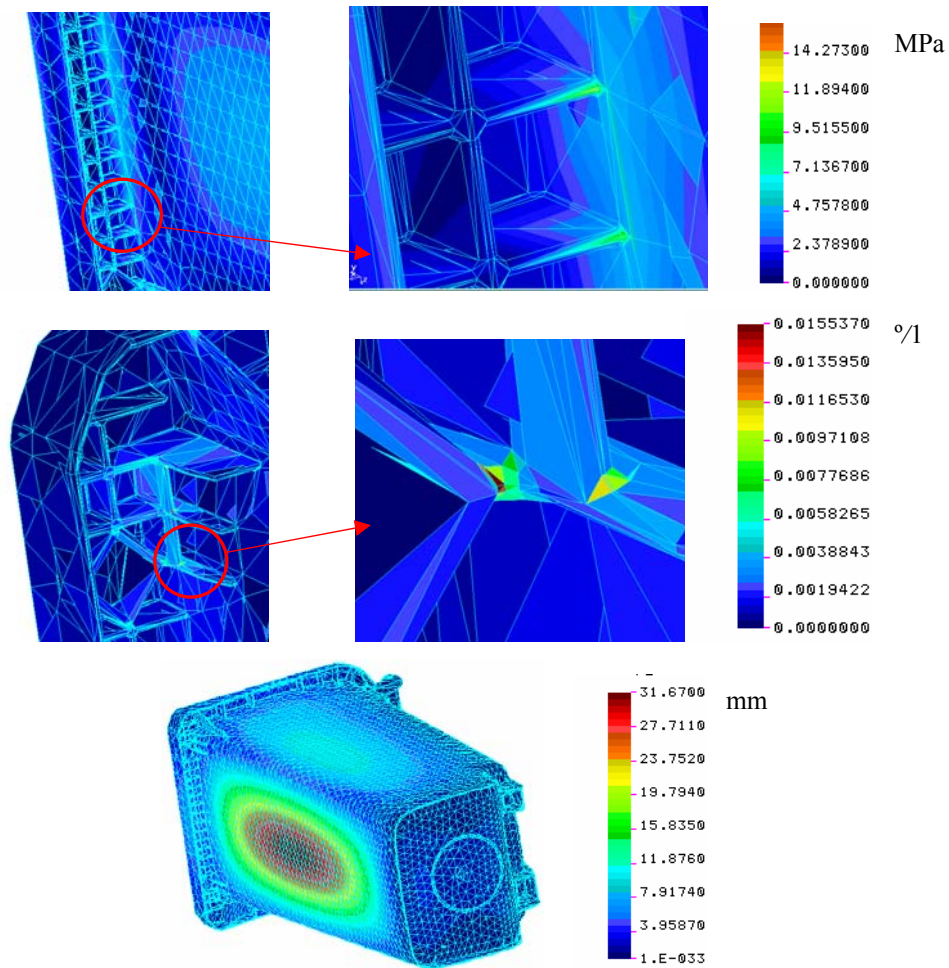


Fig. Distribución de tensiones, deformaciones y desplazamientos para el cubo al máximo de su capacidad durante su descarga

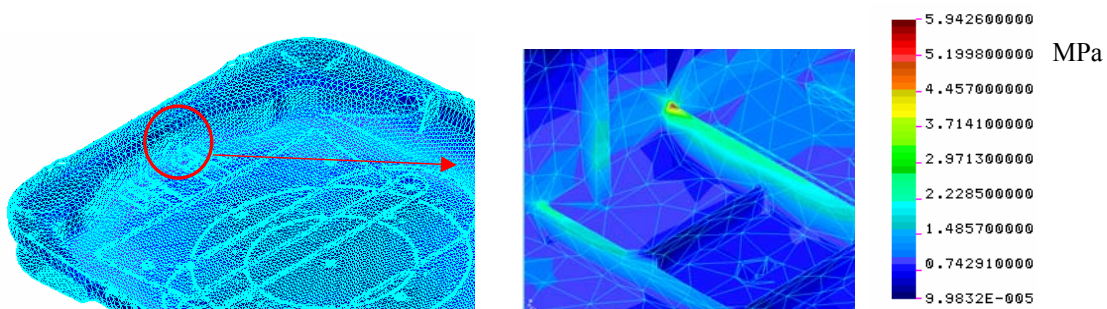
Tapa del contenedor 120L.

Peso colocado encima de la tapa:

		Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Desplazamiento máximo (mm)	Coefficiente de seguridad
<i>Virgen</i> <i>(0 %)</i>	L	5,73	0,32	1,92	4,27
	NL	6	0,31	2,63	3,96
20 %	L	5,73	0,35	2,13	4,05
	NL	6,16	0,49	4,07	3,77
40 %	L	5,73	0,38	2,31	3,99
	NL	6,15	0,47	3,93	3,71
60 %	L	5,73	0,39	2,35	3,83
	NL	6,20	0,64	5,32	3,54
80 %	L	5,73	0,51	3,10	3,67
	NL	6,51	0,73	6,35	3,23
100 %	L	5,73	0,50	3,06	3,44
	NL	5,93	0,69	5,55	3,33

Tabla. Resultados para la tapa con un peso colocado encima.

Las máximas tensiones y deformaciones aparecen en los nervios de la parte posterior de la tapa. Los máximos desplazamientos aparecen en la parte central de la superficie que soporta el peso.



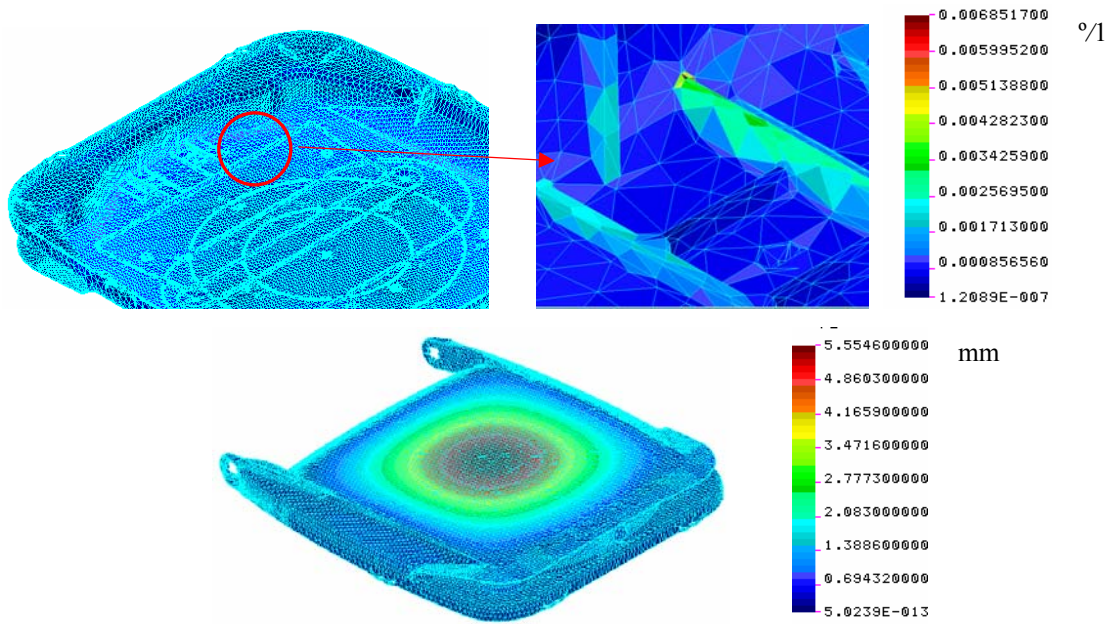


Fig. Distribución de tensiones, deformaciones y desplazamientos para la tapa con un peso colocado encima

Pieza encargada de abrir el contenedor de 2400L.

- Empuje de la pieza al abrir la tapa del contenedor:

		Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Desplazamiento máximo (mm)	Coefficiente de seguridad
Virgen (0 %)	L	8,54	0,53	1,61	2,87
	NL	8,54	0,53	1,96	2,79
20 %	L	8,54	0,53	1,79	2,72
	NL	8,78	0,81	3,04	2,64
40 %	L	8,54	0,64	1,94	2,67
	NL	8,8	0,80	2,94	2,62
60 %	L	8,54	0,65	1,94	2,57
	NL	8,88	1,05	3,97	2,47
80 %	L	8,54	0,85	2,60	2,46
	NL	9,23	1,20	4,70	2,28
100 %	L	8,54	0,84	2,60	2,31
	NL	8,88	1,16	4,20	2,31

Tabla. Resultados para el empuje de la pieza al abrir la tapa del contenedor

Las máximas tensiones y deformaciones aparecen en la zona de flexión de la pieza (concentradora de esfuerzos). Los máximos desplazamientos aparecen en el extremo de la pieza.

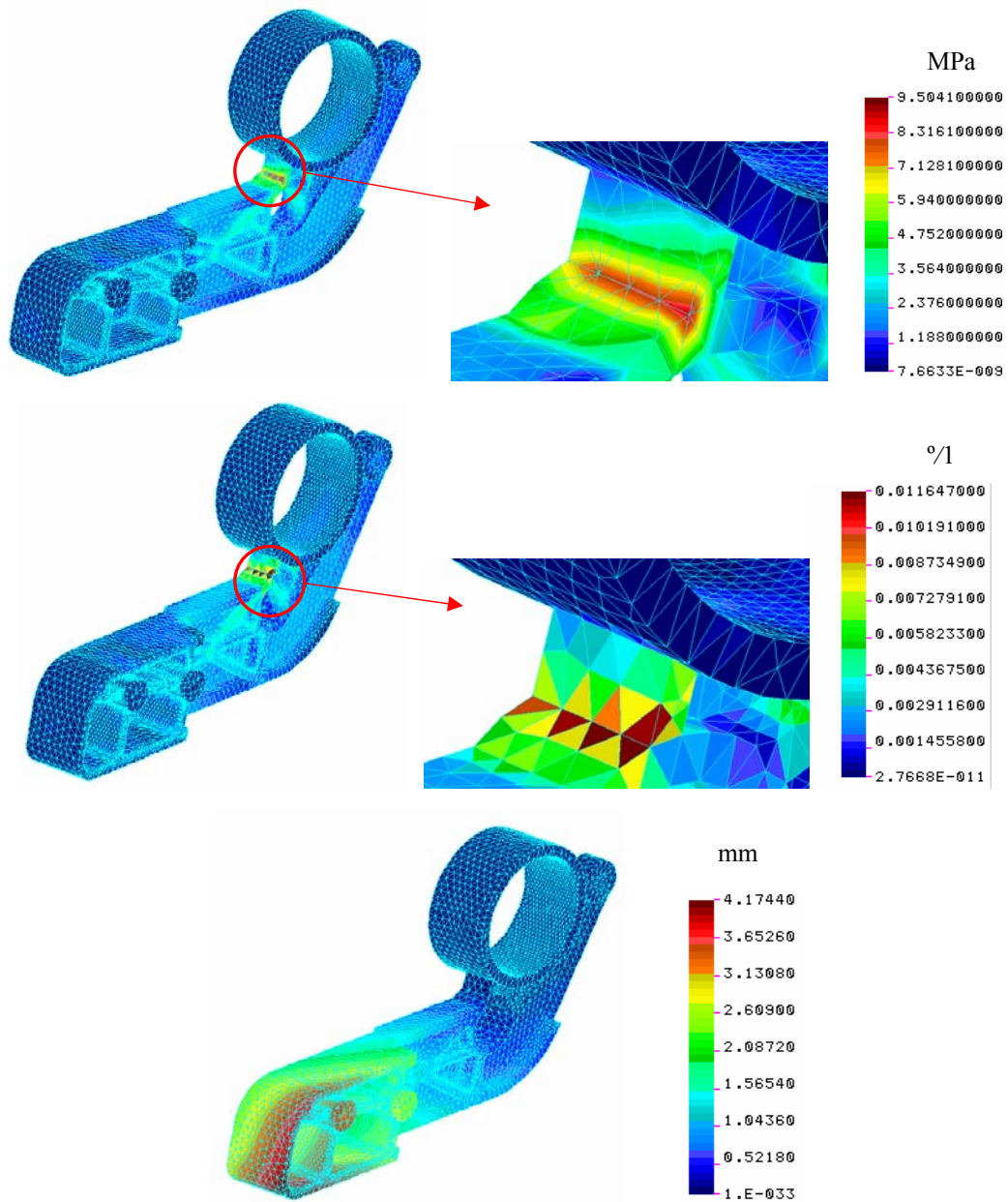


Fig. Distribución de tensiones, deformaciones y desplazamientos para el empuje de la pieza al abrir la tapa del contenedor

Análisis de los resultados.

Los valores obtenidos son similares para el análisis lineal y no lineal, aumentando su diferencia con el porcentaje de reciclado en el caso de las deformaciones y desplazamientos. En el estudio a continuación se consideran los valores del análisis no lineal (para los casos en que se ha podido realizar) por tener más precisión que el lineal.

Cubo del contenedor 120L.

AUMENTO DE 0 A 100 % RECICLADO				
	Tensiones	Deformaciones	Desplazamientos	Coefficientes seguridad
Apilado de cubos	No varían prácticamente, con un valor en torno a 6,7 MPa.	Aumentan en torno a un 100 % (de 0,25 a 0,5 % aprox.).	Aumentan en torno a un 65 % (de 0,6 a 1 mm aprox.).	Disminuyen en torno a un 15 % (de 3,6 a 3 aprox.).
Descarga del cubo al máximo de capacidad	No varían prácticamente, con un valor en torno a 15 MPa.	Aumentan en torno a un 50 % (de 1 a 1,5 % aprox.).	Aumentan en torno a un 60 % (de 20 a 32 mm aprox.).	Disminuyen en torno a un 20 % (de 1,6 a 1,3 aprox.).

Tabla. Análisis de resultados para el cubo del contenedor 120L.

Se observan 2 casos importantes: la descarga del cubo lleno al máximo de su capacidad y la situación de la base del cubo también lleno al máximo. En ellos (sobre todo en el caso de la base), la tensión máxima está próxima a los esfuerzos de fluencia (y, por tanto, a la resistencia a tracción), por lo que los coeficientes de seguridad son muy bajos. Esta situación se hace más crítica al aumentar el porcentaje de reciclado, ya que para altos porcentajes de reciclado la tensión máxima es de alrededor de 15-16 MPa, estando el esfuerzo de fluencia del PEAD próximo a 19 MPa.

Asimismo, los desplazamientos que se dan en el cubo lleno durante la descarga son altos y aumentan con el porcentaje de reciclado alcanzando valores alrededor de 32mm para altos porcentajes. Las deformaciones que aparecen en este caso son las más altas que se dan para el cubo (hasta un 1,5 %).

Respecto a los otros 2 casos, pueden observarse los altos coeficientes de seguridad para el cubo con exceso de basura en su interior (entre 10 y 7,8). En el caso del apilado de cubos, para altos porcentajes de reciclado el coeficiente baja hasta 3 y las deformaciones y desplazamientos se duplican.

Tapa del contenedor 120L.

AUMENTO DE 0 A 100 % RECICLADO				
	Tensiones	Deformaciones	Desplazamientos	Coefficientes seguridad
Peso colocado encima	No varían prácticamente, con un valor en torno a 6 MPa.	Aumentan en torno a un 130 % (de 0,3 a 0,7 % aprox.).	Aumentan en torno a un 200 % (de 2 a 6 mm aprox.).	Disminuyen en torno a un 25 % (de 4 a 3 aprox.).

Tabla. Análisis de resultados para la tapa del contenedor 120L.

Se observa que la tensión permanece constante al variar el porcentaje de reciclado, con un valor de 6 MPa que no está próximo a los esfuerzos de fluencia. El coeficiente de seguridad baja al incrementar el porcentaje de reciclado (ya que disminuye la resistencia del material), hasta un valor alrededor de 3 para altos porcentajes.

Las tensiones y deformaciones aumentan notablemente con el porcentaje de reciclado, hasta 130 % y 200 % respectivamente para altos porcentajes.

Pieza encargada de abrir el contenedor de 2400L.

AUMENTO DE 0 A 100 % RECICLADO				
	Tensiones	Deformaciones	Desplazamientos	Coefficientes seguridad
Empuje de la pieza al abrir el contenedor	No varían prácticamente, con un valor en torno a 9 MPa.	Aumentan en torno a un 100 % (de 0,5 a 1 % aprox.).	Aumentan en torno a un 100 % (de 2 a 4 mm aprox.).	Disminuyen en torno a un 20 % (de 2,8 a 2,3 aprox.).

Tabla. Análisis de resultados para la pieza encargada de abrir el contenedor 2400L.

En este caso la tensión permanece constante al variar el porcentaje de reciclado manteniendo un valor en torno a 9 MPa (no se aproxima en exceso a los esfuerzos de fluencia). El coeficiente de seguridad disminuye hasta un valor alrededor de 2,3 para altos porcentajes de reciclado.

Las deformaciones y desplazamientos aumentan en torno a un 100 % para valores altos del porcentaje de reciclado, alcanzando valores de 1 % y 4 mm respectivamente.

6.- OTRAS APLICACIONES DEL MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN.

Como se ha planteado el apartado 3.3 aparecen situaciones denominadas no convencionales donde los programas de simulación no son capaces de simular ciertas situaciones y condiciones de inyección. Destacar, por ejemplo, los procesos de sobreinyección que son cada vez más habituales en la industria de inyección de plásticos, proporcionan un mejor acabado estético en un menor tiempo de producción y con un coste muy inferior a otros métodos desarrollados anteriormente.

La introducción de una lámina o film en el interior del molde afecta a la viscosidad del material inyectado y al proceso de inyección.

Otra situación que no se puede reproducir de forma exacta son las superficies texturizadas, una técnica muy aplicada para disimular defectos superficiales en las piezas inyectadas es la utilización de texturizados. Los texturizados son una superficie más o menos rugosa, en función de la pieza que generalmente solo se aplica en uno de los lados del molde.

Cuando un molde texturizado se inyecta, el plástico no fluye con la misma facilidad por el lado del molde pulido que por el lado del molde que tiene el texturizado. Este fenómeno afecta al flujo del material y con ello a proceso de inyección.

Como hemos explicado en capítulos anteriores, los programas de simulación aplican sus ecuaciones de cálculo sobre una geometría de elementos finitos. Hay geometrías que son muy complicadas de representar con elementos finitos. Esto supone que al final el análisis de simulación está realizado sobre una geometría que no se corresponde con la pieza de plástico que se quería analizar.

Los programas de simulación actuales no disponen de ninguna aplicación que tengan en cuenta estas complicaciones y fenómenos, y debido a su influencia en la calidad del proceso y en las piezas inyectadas, sería beneficioso para la industria el poder evaluar la influencia de ellos en el proceso de inyección cuando se realizan los análisis de simulación.

La aplicación del método de caracterización desarrollado a estos casos expuestos permitiría la realización de los análisis de simulación.

6.1.- APLICACIÓN DEL MÉTODO DESARROLLADO A LA SOBREINYECCIÓN.

Piezas de plástico inyectado, obtenidas por un proceso de inyección convencional pueden conseguir acabados lisos o texturizados, pero en muchos casos, estos tipos de acabados son insuficientes.

La fuerte competencia y las nuevas exigencias del mercado provocan el desarrollo o mejora de nuevas técnicas de inyección. Actualmente hay muchos sectores que demandan piezas de plástico inyectadas con un acabado superficial determinado.

Este acabado superficial puede utilizarse para ocultar defectos superficiales, para alterar las propiedades de superficie, de protección o simplemente para decorar.

Anteriormente el acabado superficial se le daba a la pieza con procesos posteriores a la inyección. Hoy en día, por cuestiones de espacio, maquinaria y sobre todo, cuestiones económicas, el acabado superficial se le otorga a la pieza durante el mismo proceso de inyección, realizando procesos de sobreinyección.

De cara a la simulación del proceso de inyección sobre films no existe una herramienta específica, y la única opción es realizar aproximaciones con herramientas de simulación convencionales. Experimentalmente se observa que la introducción de un elemento tipo film en el molde afecta al proceso de inyección y al flujo del plástico. También se ha observado que cada film condiciona el proceso real de inyección según sus características, influyen factores como el tipo de material, su espesor, textura...etc. Esto se puede deber a que el plástico no fluye igual sobre una superficie dura y rígida como el acero que sobre el propio film.

Se propone la aplicación del método en la caracterización del conjunto “Material plástico + film” de forma que se inyecte el molde espiral introduciendo el film en el molde antes de la inyección de las espirales y obteniendo así espirales donde una de las caras del plástico hubiera fluido sobre dicho film.

Registrando las caídas de presión sobre el lado contrario podríamos obtener caídas de presión generadas en un elemento tira durante la inyección del plástico sobre el film y calcular a partir de allí una “viscosidad equivalente” que reflejara el comportamiento “Plástico + film”. A partir de la caracterización “plástico + film” se obtendría un “modelo viscoso equivalente” que introducido en un programa de simulación reflejaría la influencia del film durante el llenado del molde. Esto permitiría el análisis de la distribución de presiones durante el llenado teniendo en cuenta el efecto del film, análisis que tiene una importancia fundamental en el diseño de un molde inyectado sobre film, para un diseño correcto del sistema de alimentación de cara a evitar la aparición de uno de los defectos más importantes, los traspasos generados por elevadas presiones en el interior de la cavidad.

Dentro del proceso de la sobreinyección se pueden distinguir distintas técnicas, en función del acabado que sea requerido. El proceso de inyección es común para todas las técnicas, solo se diferencian en el acabado superficial que proporcionan a la pieza inyectada que varía en función de las características de la película sobre la que se realiza la sobreinyección.

Las técnicas utilizadas son:

- IMD (In-mould decoration)
- Inyección sobre láminas plásticas.
- Inyección sobre films.

IMD (In-mould decoration).

El objetivo de la sobreinyección con esta técnica es exclusivamente decorativo.

En este proceso se introduce una lámina con símbolos, dibujos, letras, colores...en el interior del molde para que quede estampada en la superficie de la pieza durante el proceso de inyección. La temperatura y la presión que se crea en el interior del molde durante el proceso de inyección, permiten la unión de la lámina a la pieza inyectada.

La lámina que se introduce en el molde suele ser de poliéster, con un recubrimiento de color en la cara que se pone en contacto con el molde y un adhesivo en la cara que se pone en contacto con la pieza de plástico.



Fig. Laminas utilizadas en esta técnica de sobreinyección

Con la aplicación de esta técnica de sobreinyección se puede conseguir multitud de colores en una sola aplicación, rápido cambio de decoración ya que solo es necesario cambiar la lámina, y aplicación a piezas de muy bajos espesores.



Fig. Ejemplo de artículo decorado con IMD

Inyección sobre láminas plásticas.

Aplicando este tipo de técnica, la sobreinyección se realiza sobre láminas plásticas parcialmente rígidas, de unos 0,5 -0,6mm de espesor, dependiendo de la geometría de la misma.

Las láminas que mas frecuentemente se utilizan son de ABS o policarbonato, aunque en ocasiones también se utilizan láminas multicapa para conseguir cualidades especiales en al pieza sobreinyectada.

El proceso de inyección es análogo al de la técnica anterior, la lámina se introduce en el interior del molde en cada ciclo mediante un robot. Se recomienda trabajar a baja presión para evitar deteriorar la lámina interior, y para conseguirlo se aconseja el uso de cámaras calientes e inyección secuencial



Fig. Ejemplos de piezas realizadas mediante inyección sobre láminas plásticas.

Inyección sobre films.

Esta técnica de sobreinyección consiste en la inyección de una pieza de plástico sobre una lámina de film flexible y poroso, para dar a la pieza de plástico un tacto suave más agradable.

Durante la sobreinyección con esta técnica, al tratarse de una lámina muy flexible, es necesario mantener una cierta tensión en el film sobre el que se va a inyectar la pieza de plástico para evitar arrugas. Para poder mantener la tensión, la lámina es sujeta por el exterior del molde, lo que supone que la lámina sobresale por los extremos del molde cuando este está cerrado durante el ciclo de inyección.

El film sobrante se recorta una vez que la pieza ha salido del molde y se ha enfriado.

En este caso el molde con el que se va a realizar esta sobreinyección debe ser especial ya que tiene que disponer de tensores externos para sujetar y tensar la lámina durante la sobreinyección



Fig. Ejemplos de inyección sobre films.

6.1.1.- Descripción del proceso de sobreinyección.

El proceso de sobreinyección es similar al proceso de inyección, solo hay que introducir la lámina sobre la que se desea inyectar la pieza, en el molde, previamente a realizar el ciclo de inyección. Por otro lado, es necesario adaptar algunos de los medios de inyección a la técnica de sobreinyección que se aplique en cada caso.

Alimentador de láminas

Para la aplicación de la técnica de IMD y sobre láminas plásticas es necesario un robot alimentador de láminas, que sitúe la lámina que va ser sobreinyectada en el interior del molde, en cada ciclo de inyección.

Es preferible que sea una operación mecánica y que no sea realizada por un operario, para mejorar ciclos y costes de producción y evitar riesgos laborales.

Para la sobreinyección sobre films, no es necesario un alimentador del tipo descrito para las técnicas anteriores. El film debe ser tensado por el exterior del molde, para evitar arrugas y deformaciones en la pieza sobreinyectada

Moldes

Para la sobreinyección con láminas decorativas o de plástico semi-rígido, el molde no necesita ningún requerimiento muy específico, solo es necesario tener en cuenta ciertas cuestiones cuando se realiza el diseño del mismo.

El punto de inyección y el sistema de expulsión no se pueden localizar en la misma superficie donde se introduce la lámina, ya que esta podría deteriorarse durante el ciclo de inyección. Dependiendo de la geometría de la pieza que se quiere producir, estas premisas pueden complicar el diseño del molde considerablemente, ya que puede ser necesario tener que expulsar la pieza por el lado fijo del molde.

También se debe tener precaución en la elección de los puntos de inyección de la pieza. Es conveniente que el propio flujo de material desde el momento que entra en el interior del molde comprima la lámina contra la superficie de la cavidad, para evitar arrugas, roturas de la lámina y que el plástico pueda alcanzar el reverso de la lámina.

Para evitar problemas de arrastre de la lámina por el flujo de plástico durante la inyección, en algunos casos, se mecaniza un alojamiento para la lámina en la cavidad del molde.

En la sobreinyección sobre films, el molde es la herramienta más importante para la obtención de piezas de calidad.

El film se coloca la parte móvil del molde, debe ser sujetado y tensado desde el exterior del mismo para evitar deformaciones y arrugas durante la sobreinyección, aunque no excesivamente, ya que debe permitir que se adapte a la huella de la pieza en el interior del molde.

Se recomienda para el diseño del sistema de alimentación que los recorridos de flujo sean cortos para evitar altas presiones que pudiesen arrugar o perforar el film. El uso de cámaras calientes y llenado secuencial es habitual en este tipo de moldes.

Como en algunos de los casos anteriores, para no dañar el film, la expulsión de la pieza se realiza por el lado fijo del molde, ya que el film se encuentra en la superficie del lado móvil.

Tipos de láminas y films

En función de la técnica de sobreinyección que se aplique, varían los tipos de láminas y films.

En el caso de IMD, es una lámina de plástico estampada con el motivo decorativo deseado por una de las caras y con un adhesivo por la otra.

En la sobreinyección sobre láminas semi-rígidas, estas pueden ser de diversos materiales, ABS, PC, caucho, láminas multicapa... Va a depender de la geometría y funcionalidad de la pieza final que se quiera obtener. Generalmente va a ser una pieza de plástico inyectada en otro material para aportar el acabado superficial a la pieza final.

En la inyección sobre film existen de muchos tipos; de 2 capas, de 3 capas, con espuma, TPO, PVC... dependiendo del acabado final que se quiera obtener de la pieza inyectada.

Máquina de inyección.

En general no se precisa de ninguna máquina especial. Es recomendable que esté preparada para realizar inyección secuencial, ya que por los motivos que hemos explicado anteriormente, es un sistema de inyección utilizado habitualmente en los procesos de sobreinyección.

Defectos característicos.

En este proceso de sobreinyección, a parte de los defectos generales que pueden aparecer en cualquier pieza de plástico inyectada, pueden aparecer defectos estéticos específicos.

- **Arrugas:** Pueden producirse debido a dos causas principales; a que el film se halla arrugado durante el proceso de cierre de molde o que se halla producido una línea de soldadura en la pieza de plástico inyectada.
- **Piel de naranja:** Es un defecto que aparece en los films de tres capas, cuando el material plástico se introduce entre la espuma y la capa barrera. Se produce una degradación térmica de la espuma que provoca la aparición de esta textura característica en la superficie vista de la pieza sobreinyectada.
- **Estiramientos:** Este efecto se produce debido a un exceso de presión en el interior del molde. El film se deforma y pierde su aspecto característico.

- Traspasos: Este efecto ocurre cuando el plástico atraviesa el film sobre el que se está inyectado. Este defecto deja inservible la pieza ya que daña la superficie visible de la pieza. Las causas principales que provocan este defecto son; la permeabilidad del film, el espesor de las capas, la tensión a la que se somete el film durante la inyección, la porosidad del film, la temperatura de inyección elevada y principalmente, la alta presión en el interior de la cavidad.
- Orientación del material: Si la orientación del material en el interior del molde varía durante el llenado de la pieza de plástico, el film puede verse afectado provocando efectos de aplastamiento, contrapelo u ondas en la superficie exterior del film.
- Superficie aplastada: El film pierde parte de su espesor por aplastamiento debido a las embuticiones del molde y la presión en el interior de la cavidad durante el proceso de sobreinyección.
- Puntos fríos: Este efecto se produce cuando el material que está preparado en la boquilla para la siguiente inyectada se queda frío. El uso de cámaras calientes en este tipo de proceso reduce considerablemente la aparición de este defecto.

6.1.2.- Simulación de la sobreinyección con programas informáticos actuales.

En los programas de simulación de inyección no existe un módulo específico para la simulación de procesos de sobreinyección.

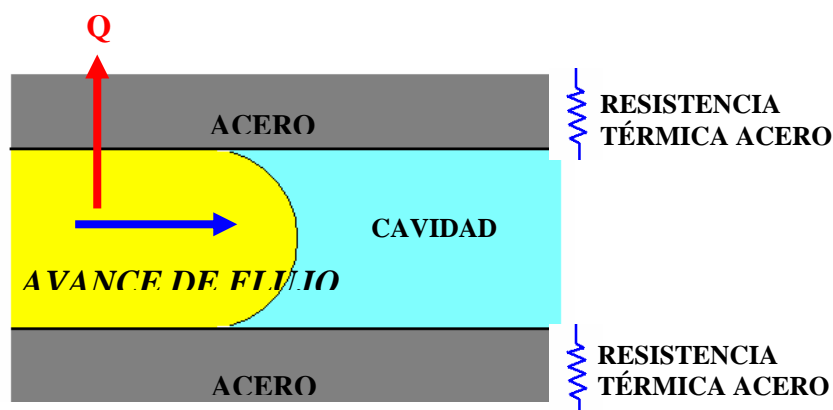
Es imposible simular la sobreinyección como tal, ya que es muy complicado introducir todas las variables que afectan a la inyección de la pieza de plástico debido al film o la lámina que se ha introducido en el interior del molde.

La introducción de un film o una lámina afecta a parámetros determinantes para la realización de una simulación. Estos parámetros son:

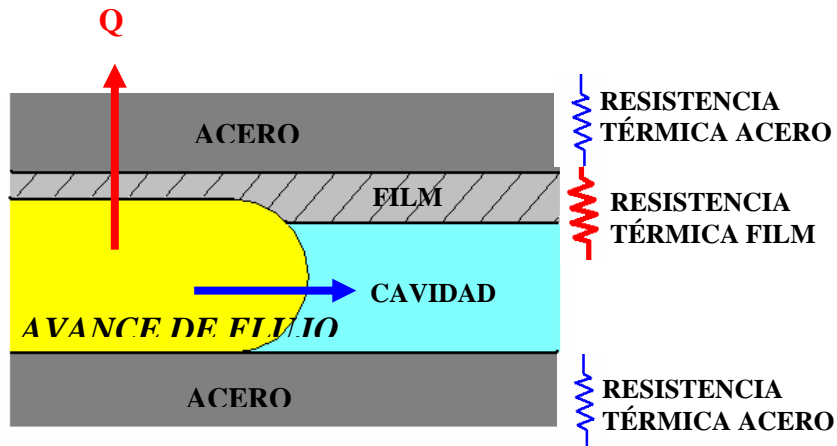
Conductividad térmica

Los programas de simulación están diseñados para simular la transferencia de calor entre el material metálico del que está hecho el molde y el plástico que se inyecta. Para poder realizar estos cálculos, el programa dispone de los valores de conductividad térmica en las bases de datos, de los materiales de fabricación de moldes y de los distintos materiales plásticos.

$$\text{Conductividad térmica} = \lambda \text{ (W/m K)} = \frac{\text{espesor (m)}}{R_{\text{térmica}} \text{ (m}^2 \text{ K/W)}}$$

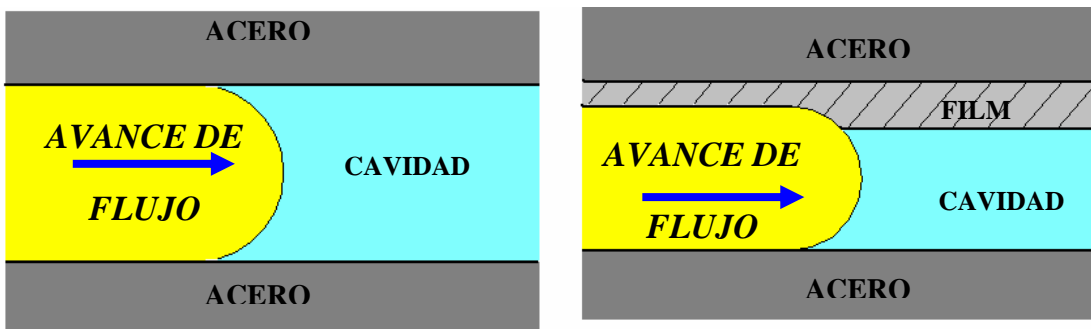


El film o las láminas actúan como aislantes durante el proceso de inyección y el programa no está capacitado para evaluar como queda afectado este parámetro cuando se introducen entre la cavidad del molde y el plástico inyectado.



Compresión

A diferencia del acero, las láminas y los films no son materiales rígidos, se comprimen conforme el plástico avanza por el interior del molde, por lo que la sección de paso en la cavidad del molde puede variar durante el ciclo de inyección en función de las condiciones de proceso.



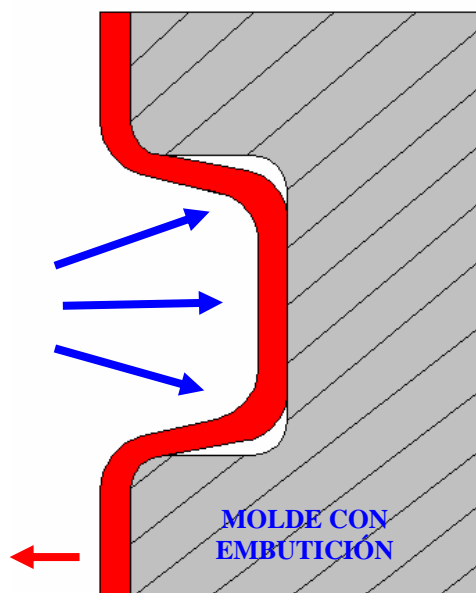
Rugosidad

La textura y el acabado superficial del film o la lámina que está en contacto con el plástico, afecta al avance del flujo durante la inyección, ya que este no fluye de la misma manera que sobre una superficie pulida como la de un molde de acero.

En los procesos de sobreinyección, solo un lado de la pieza de plástico está en contacto con el film o la lámina. La diferencia de rugosidad entre las caras de la pieza de plástico provoca que el avance de flujo no sea simétrico.

Tensión de los films

La tensión a la que se someten algunos films durante el proceso de sobreinyección para evitar arrugas y defectos estéticos, influye en el volumen final de la cavidad y en las deformaciones de la pieza.



Todos estos factores afectan de forma significativa en un proceso de sobreinyección, por lo que no se pueden despreciar cuando se realiza una simulación de este tipo de proceso.

El método de trabajo desarrollado puede ser una alternativa para poder simular este tipo de procesos. Mediante el método desarrollado se puede calcular un modelo viscoso equivalente que agrupe tanto la influencia de la máquina de inyección en la fluidez del material, como la viscosidad del plástico, como todos los factores que se han detallado anteriormente y que afectan a la fluidez del material en el interior del molde.

Para obtener un modelo viscoso equivalente que englobe todos estos factores es necesario realizar las pruebas de inyección con el molde espiral como en los apartados anteriores, pero introduciendo antes de cerrar el molde la lámina o film acerca de la que queremos conocer su influencia en ella fluidez del material. De esta forma los sensores recogen los valores de presión que se producen en el interior de la cavidad como resultado de la inyección del material sobre una lámina o film que está colocada únicamente en una de las caras del molde. De esta forma analizamos el conjunto formado por material y film.

Con los valores de presión recogidos en los ensayos y mediante el método de caracterización desarrollado y explicado detalladamente en el apartado 4, se obtiene un modelo viscoso equivalente que caracteriza el conjunto material y film. Con este modelo viscoso equivalente se pueden realizar las simulaciones de inyección de forma convencional ya que la variación de factores que incluye film en la inyección esta contenida en el modelo viscoso equivalente con el que se realizan los ensayos de simulación.

6.1.3.- Aplicación de la metodología a procesos de sobreinyección.

En este apartado se va a describir el material utilizado para la realización de los ensayos de inyección para la caracterización reológica conjunta del material y la lámina o film, y las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos.

Material.

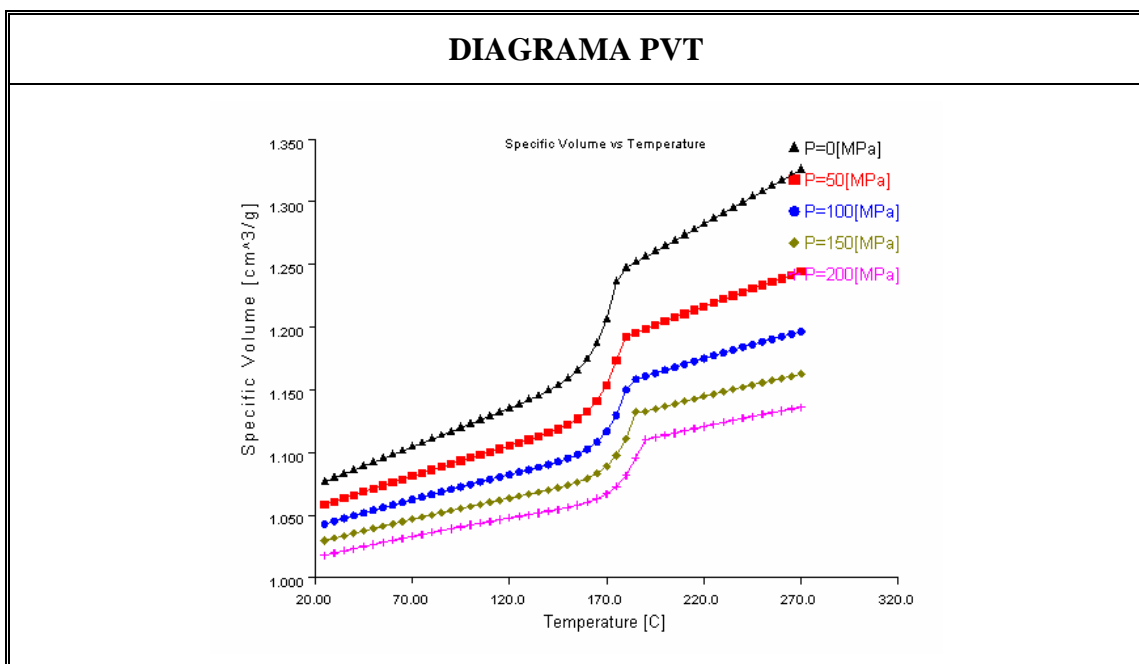
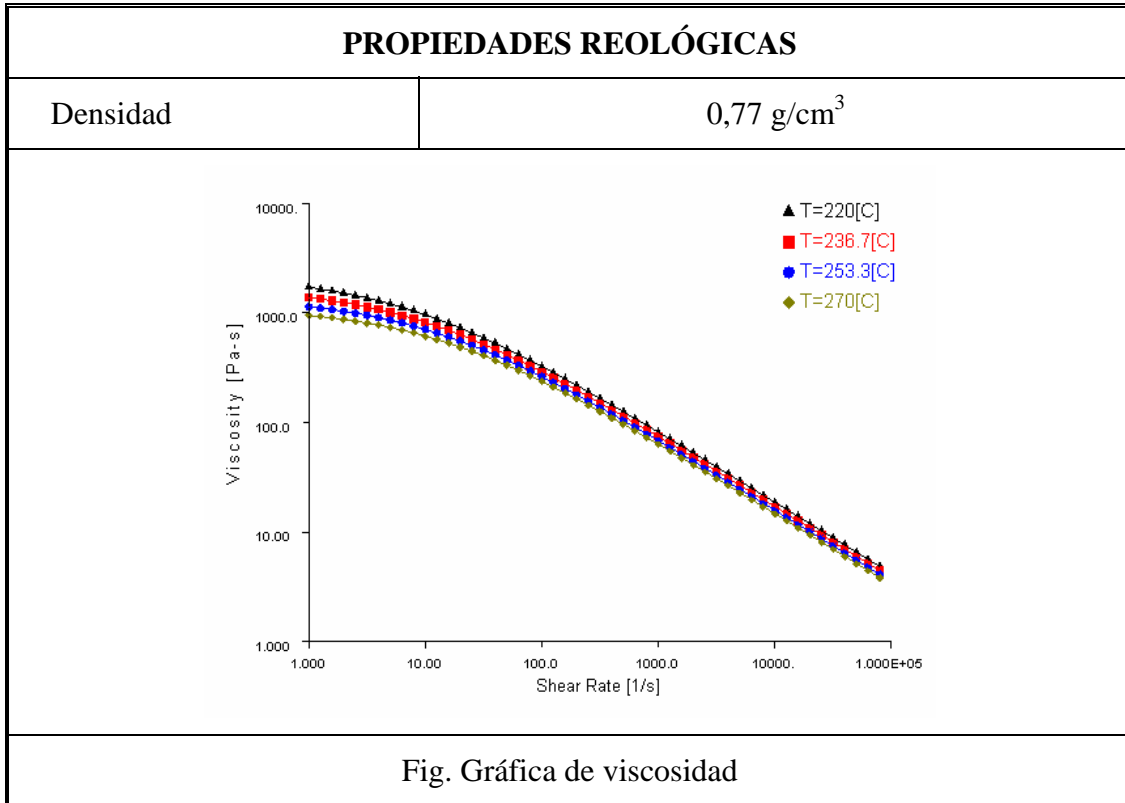
Para la caracterización del proceso de sobreinyección de distintos tipos films, se utiliza un mismo material plástico. El material utilizado es un polipropileno, en concreto el; *PP HC 31 STAMYLAN*, utilizado frecuentemente en sobreinyecciones de films.

Las propiedades termoplásticas de este material facilitadas por el fabricante se detallan a continuación:

CONDICIONES DE PROCESO RECOMENDADAS		
Temperatura del molde	Rango de T ^a recomendado	20 -60°C
Temperatura del material	Rango de T ^a recomendado	220 -270 °C
Temperatura de expulsión	76 °C	
Shear stress máximo.	0,25 MPa	
Shear rate máximo.	100000 1/s	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	Temperatura (T ^a)	Calor específico (C _p)
	240° C	2690 J/kg·C
Conductividad térmica	Temperatura (T ^a)	Conductividad térmica (K)
	240° C	0,18 W/m·C

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Tensión del 1% elongación	1300 MPa



Tipos de films.

Para poder comparar los modelos viscosos y los resultados que se obtengan, se realizan los ensayos de inyección con dos tipos del films usados frecuentemente en la industria.

Film clase A

Film compuesto por dos capas. Una se denominada film barrera, es de color claro y es la cara del film que se encuentra en contacto con la pieza de plástico inyectada, es decir, es la cara interna.



Imagen del film clase A por ambas caras.



Imágenes de la espiral inyectada sobre el film de clase A

Film clase B

Film compuesto también de dos capas, igual que el film anterior, solo que en este caso el espesor es mayor. Esto provoca una reducción en la sección de paso del plástico en el sentido de avance del flujo durante la inyección, lo que afecta directamente al modelo viscoso.



Imagen del film clase B por ambas caras.

Maquina de inyección.

La máquina de inyección que se va a utilizar para realizar los ensayos de sobreinyección, es una Mateu &Sole de 55 Ton, de dimensiones adecuadas en tamaño y capacidad de fuerza de cierre para inyectar el molde espiral con el que vamos a realizar los ensayos.

A continuación se recogen los datos característicos de esta máquina, que permiten comprobar que es del tamaño y con las características apropiadas para inyectar el molde espiral.

MATEU & SOLE 55 TON



Imagen de la máquina de inyección utilizada para realizar los ensayos

CIERRE	Fuerza de cierre		TN	55
	Espesor de molde	Mínimo	mm	120
		Máximo	mm	300
	Carrera máxima de apertura		mm	350
	Tamaño de los platos Hp x Vp		mm	525x525
	Paso entre columnas H x V		mm	355x355
	Distancia máxima entre platos		mm	650
	Diámetro de las columnas		mm	60
	Fuerza máxima de expulsión		KN	44
	Carrera máxima de expulsión		mm	130
Sistema de cierre			hidráulico	

INYECCIÓN	Diámetro del husillo	mm	35
	Relación L/D del husillo		20,5
	Presión máxima de inyección	Bar	1735
	Volumen teórico de inyección	cm ³	155
	Peso máximo de inyección	Gr.	140
	Caudal de inyección teórico	cm ³ /s	91
	Capacidad de plastificación	gr/s	50
	Velocidad regulable del husillo	min ⁻¹	216
	Par de giro del husillo	Nm	696
	Zonas de calefacción	Nº	4+1
	Potencia de calefacción	Kw	9,58
	Fuerza máxima de apoyo boquilla	KN	90,7
	Carrera máxima de la boquilla	mm	320

GENERALES	Ciclos en vacío	min ⁻¹	60
	Potencia del motor	KW (cv)	15 (20)
	Peso neto de la máquina	Kg.	3200

Temperaturas de material.

Las sobreinyecciones se analizan utilizando tres temperaturas de material diferentes, intentando abarcar el mayor rango posible dentro de las temperaturas de inyección recomendadas por el fabricante del material.

Hay que tener en cuenta también la temperatura máxima que soporta el film sobre el que se va a realizar la sobreinyección.

A partir de estas premisas, las temperaturas a las que se realizan los ensayos de sobreinyección para el cálculo del modelo viscoso son: 200°C, 220° C y 240° C

Velocidad de inyección.

Como se explica en apartados anteriores, este no es un parámetro determinante ya que el valor exacto del caudal introducido en cada uno de los ensayos realizado se obtiene de los valores recogidos por los sensores de presión.

Para cada una de las temperaturas de inyección determinadas se realiza un barrido de velocidades.

La elección de los valores de estas velocidades de inyección se determina experimentalmente, ya que se debe cumplir la condición de que en el ensayo donde las condiciones de inyección sean las más desfavorables, el plástico alcance la posición de los dos sensores para poder realizar las medidas.

Las velocidades a las que se realizan las pruebas de inyección son porcentajes de la velocidad máxima y mínima que ofrece las características técnicas de la máquina de inyección. Estos porcentajes son 25, 50, 75 y 100%.

Procedimiento.

Para cada tipo de film, se ensaya la sobreinyección a 3 temperaturas diferentes, a 4 velocidades cada temperatura y se realizan tres inyecciones iguales para cada condición impuesta.

El film se puede colocar tanto en el lado fijo como en el lado móvil del molde, depende principalmente de la geometría de la pieza. Lo que se ve condicionado por la introducción del film es por donde se realiza la inyección, ya que tiene que colocarse en la parte opuesta del molde. En función de la geometría de la pieza, y donde se sitúe el film, el diseño del molde puede complicarse en gran medida.

En este caso, el molde ya está fabricado y por la geometría de la pieza y la situación de los sensores, el film se coloca en la parte móvil del molde para la realización de los ensayos.

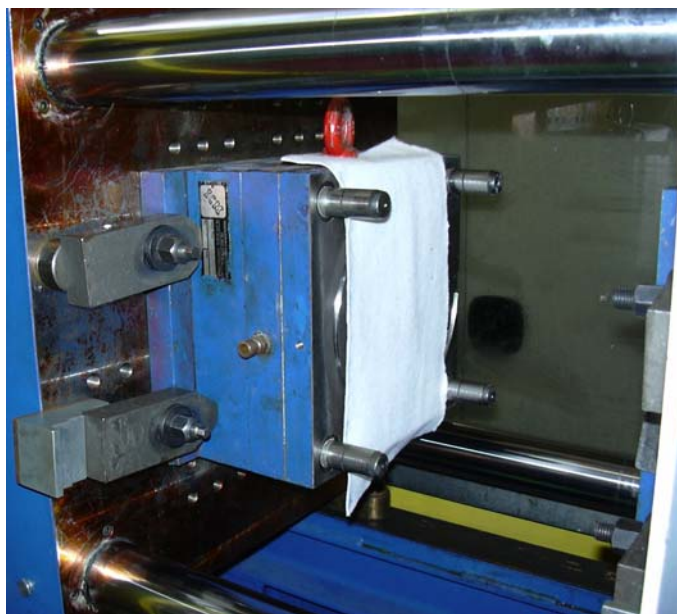


Fig. Film colocado en la parte móvil del molde espiral.

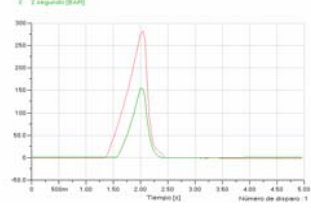
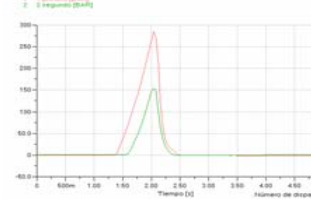
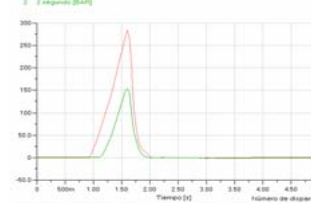
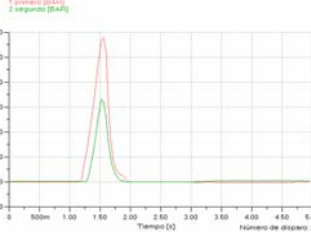
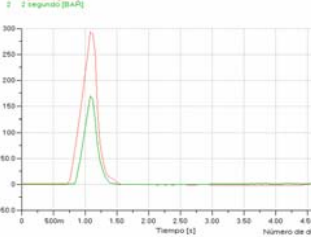
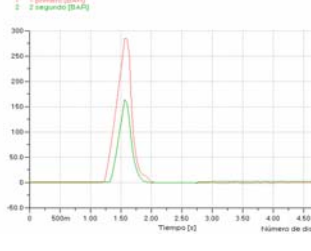
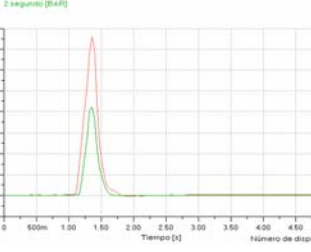
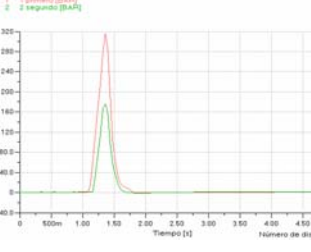
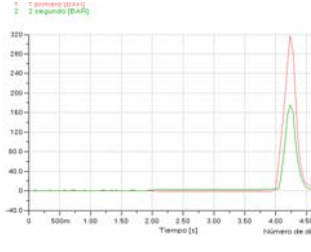
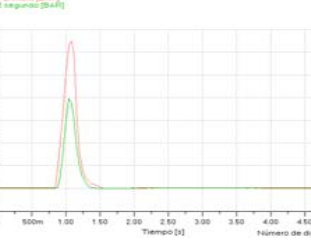
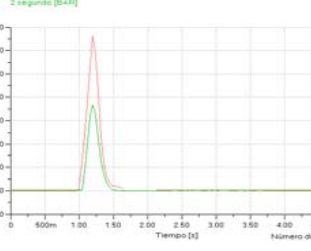
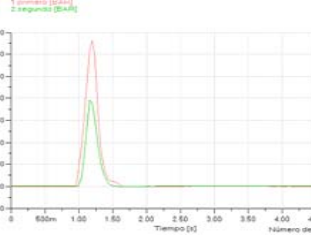
En la realización de estas pruebas, el film se sujeta al molde utilizando el cáncamo. Para la producción industrial de piezas sobreinyectadas los films se sujetan con sistemas más complejos que los tensan con marcos, pesos u otros sistemas que ayudan a evitar la formación de defectos superficiales como burbujas, desplazamientos o arrugas.

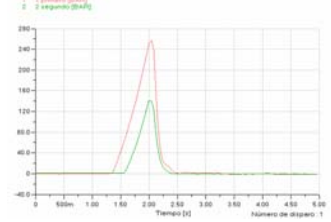
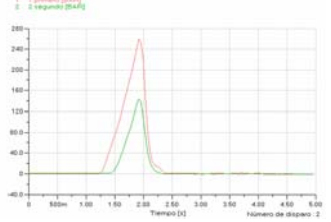
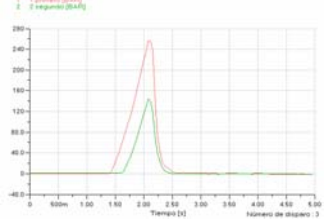
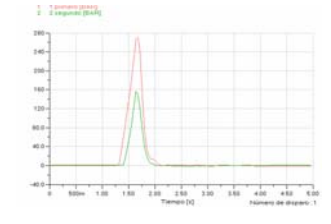
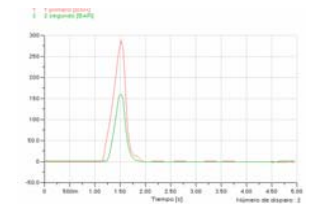
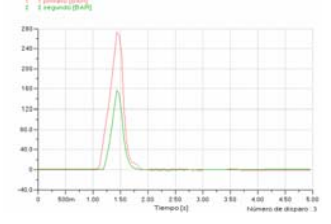
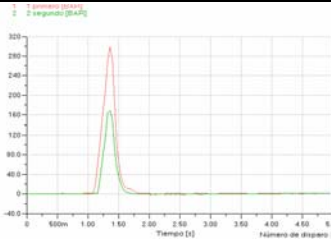
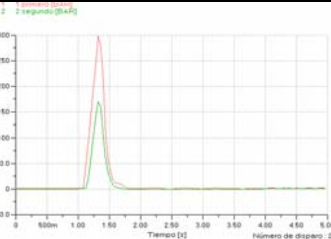
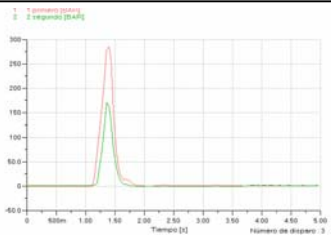
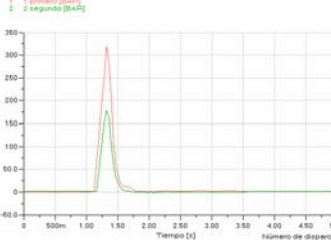
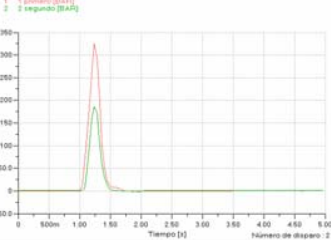
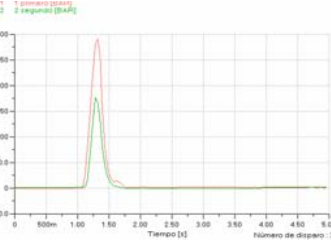


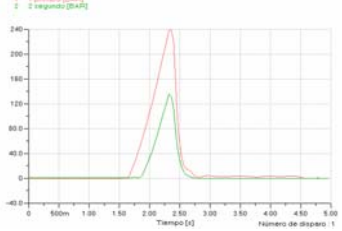
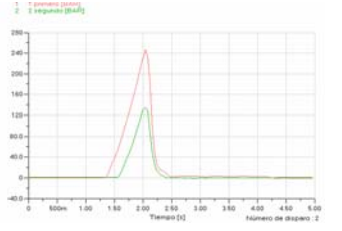
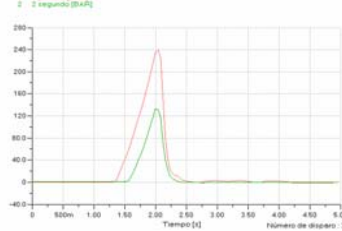
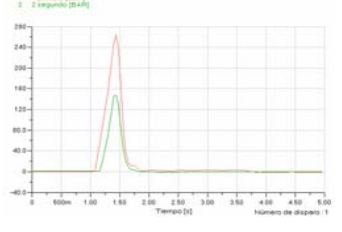
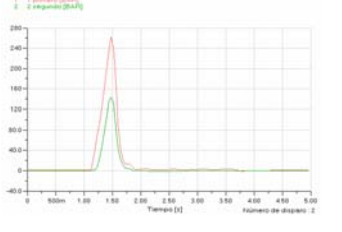
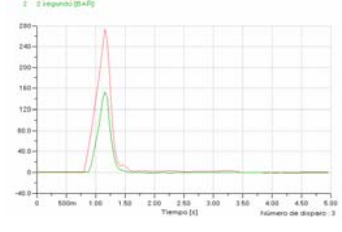
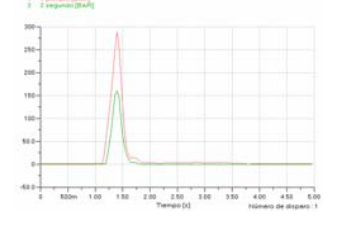
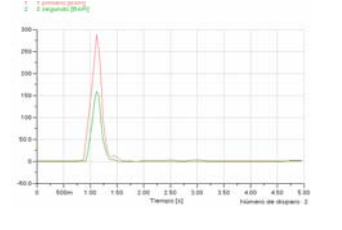
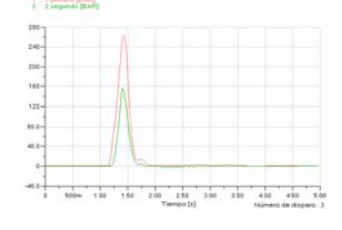
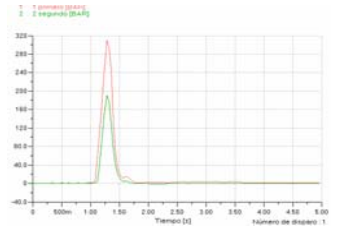
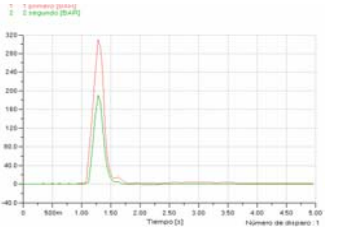
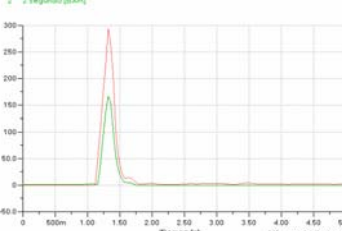
Fig. Inyección de la espiral de plástico sobre el film.

De la realización de ensayos se obtienen resultado de presión en cada uno de los sensores y el tiempo transcurrido desde que el material alcanza cada uno de los sensores.

En las tablas que se presentan a continuación y a modo de ejemplo de las medidas que se obtienen de los sensores de presión, se recogen las gráficas con los valores de presión medidos por cada uno de los sensores en función del tiempo para los ensayos realizados para el film de clase A.

T ^a (°C)	V(%)	DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3
200	25			
	50			
	75			
	100			

T ^a (°C)	V(%)	DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3
220	25			
	50			
	75			
	100			

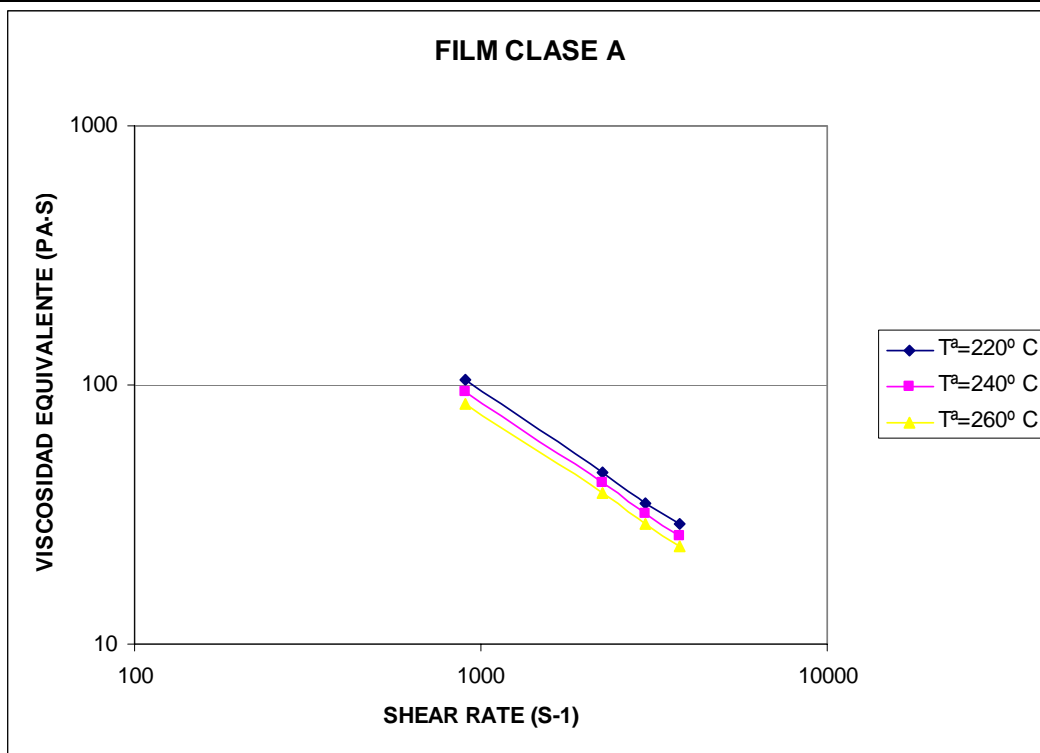
T ^a (°C)	V(%)	DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3
240	25			
	50			
	75			
	100			

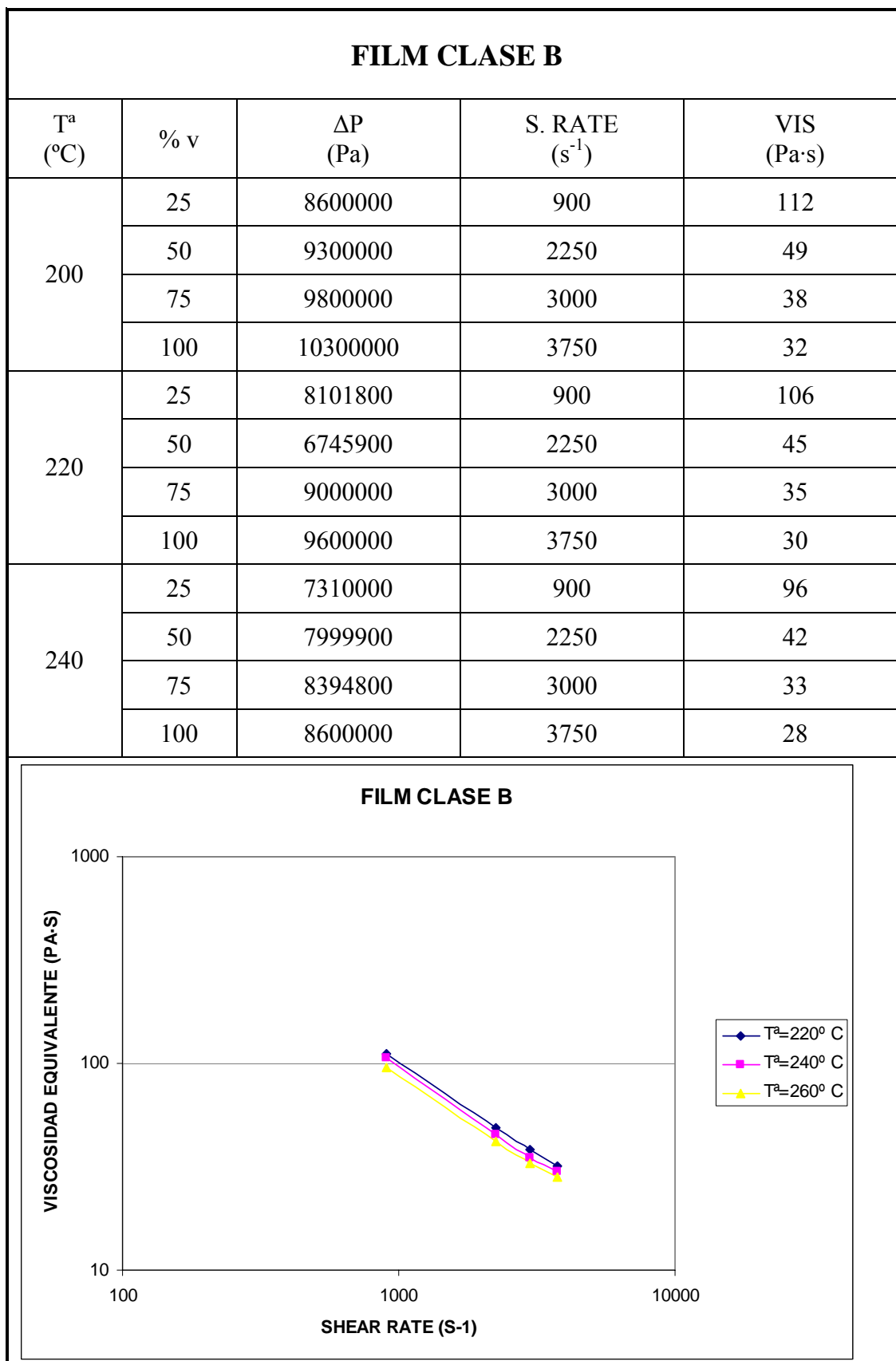
6.1.4.- Cálculo del modelo viscoso de un proceso de sobreinyección con la metodología desarrollada.

La obtención de los valores que se recogen de los sensores de presión en cada uno de los ensayos de inyección realizados y los cálculos posteriores que se deben realizar para la obtención de los valores de viscosidad y de los modelos viscosos correspondientes, se realiza de la misma forma que se realiza en el capítulo 5 para la obtención de los modelos viscosos de los materiales con distintos porcentajes de material reciclado.

Aplicando las ecuaciones correspondientes a las caídas de presión y a los tiempos recogidos con los sensores de presión, se obtienen valores de viscosidad para cada tipo de film, temperatura y velocidad de inyección ensayada, que se recogen en las siguientes tablas.

FILM CLASE A				
T^a (°C)	% v	ΔP (Pa)	S. RATE (s ⁻¹)	VIS (Pa·s)
200	25	8017900	900	105
	50	8705800	2250	46
	75	8731600	3000	35
	100	9085700	3750	29
220	25	7214600	900	94
	50	7758000	2250	42
	75	8331800	3000	32
	100	8484200	3750	26
240	25	6314600	900	84
	50	7171800	2250	38
	75	8185300	3000	29
	100	7785900	3750	24





Se introducen en el VISDAT las parejas de valores de shear rate y viscosidad para cada una de las temperaturas ensayadas, y se obtienen los valores de las seis constantes que definen el comportamiento viscoso de cada film ensayado a través de la ecuación del modelo viscoso de 2º orden.

Ecuación de un modelo viscoso de 2º orden:

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\gamma) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \ln(\gamma)^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\gamma) + A_5 \cdot T^2$$

Donde:

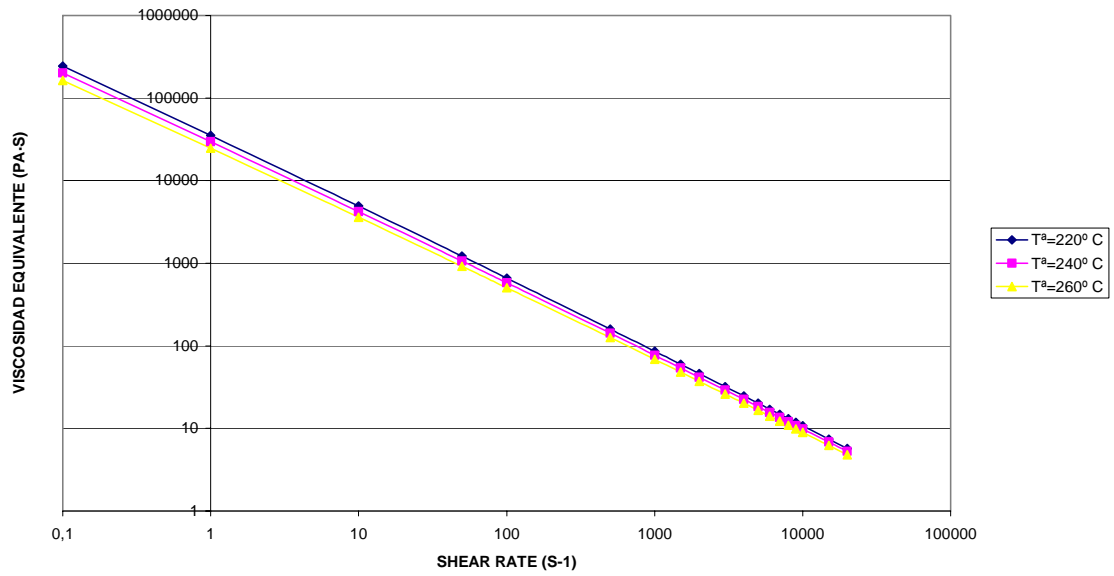
- η ; La viscosidad en Pa·s.
- A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 y A_5 ; constantes del material. Adimensionales.
- γ ; es el shear rate o velocidad de cizalla, en s^{-1} .
- T es la temperatura en °C.

En la siguiente tabla se recogen los valores de las constantes del modelo viscoso de 2º orden de cada film ensayado.

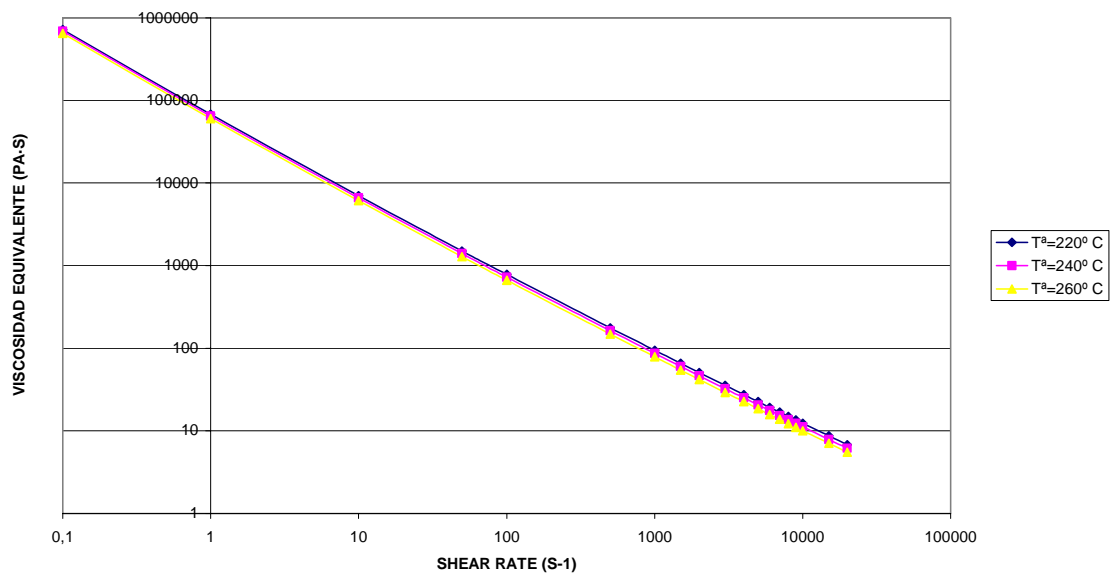
MATERIAL	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
FILM CLASE A	11,769	-0,95	-3,39E-03	-3,44E-03	4,66E-04	-1,14E-05
FILM CLASE B	10,835	-0,955	5,09E-03	7,45E-03	-2,24E-04	-1,70E-05

Las curvas de viscosidad obtenidas para cada material se representan a continuación:

FILM CLASE A



FILM CLASE B



6.1.5.- Aplicación del modelo viscoso equivalente obtenido a los programas de simulación.

En este apartado se procede a introducir las constantes de los modelos viscosos obtenidos en el apartado anterior, para cada uno de los films ensayados, en la base de datos del programa de simulación de inyección.

Con los modelos viscosos calculados en la base de datos, se realizan simulaciones de inyección con cada uno de los modelos viscosos a dos geometrías distintas.

Las geometrías elegidas para realizar estos análisis de simulación son dos.

La primera el molde espiral. Realizar este análisis de inyección permite comparar los resultados que se obtengan de las simulaciones con los recogidos durante los ensayos de inyección para la obtención de los modelos viscosos, de la misma manera que se realiza en el capítulo 6 con el análisis del porcentaje de material reciclado.

La otra geometría simulada es un producto de la empresa CONTENUR, una tapa correspondiente a un cubo de 340L, cuyo diseño y molde está preparado para realizar “in-mould decoration”, inyecciones sobre láminas decorativas.

En los dos casos, las condiciones de proceso que se utilizan para realizar las simulaciones con cada uno de los modelos viscosos, son las mismas para que los resultados que se obtengan sean comparables entre sí.

Molde espiral.

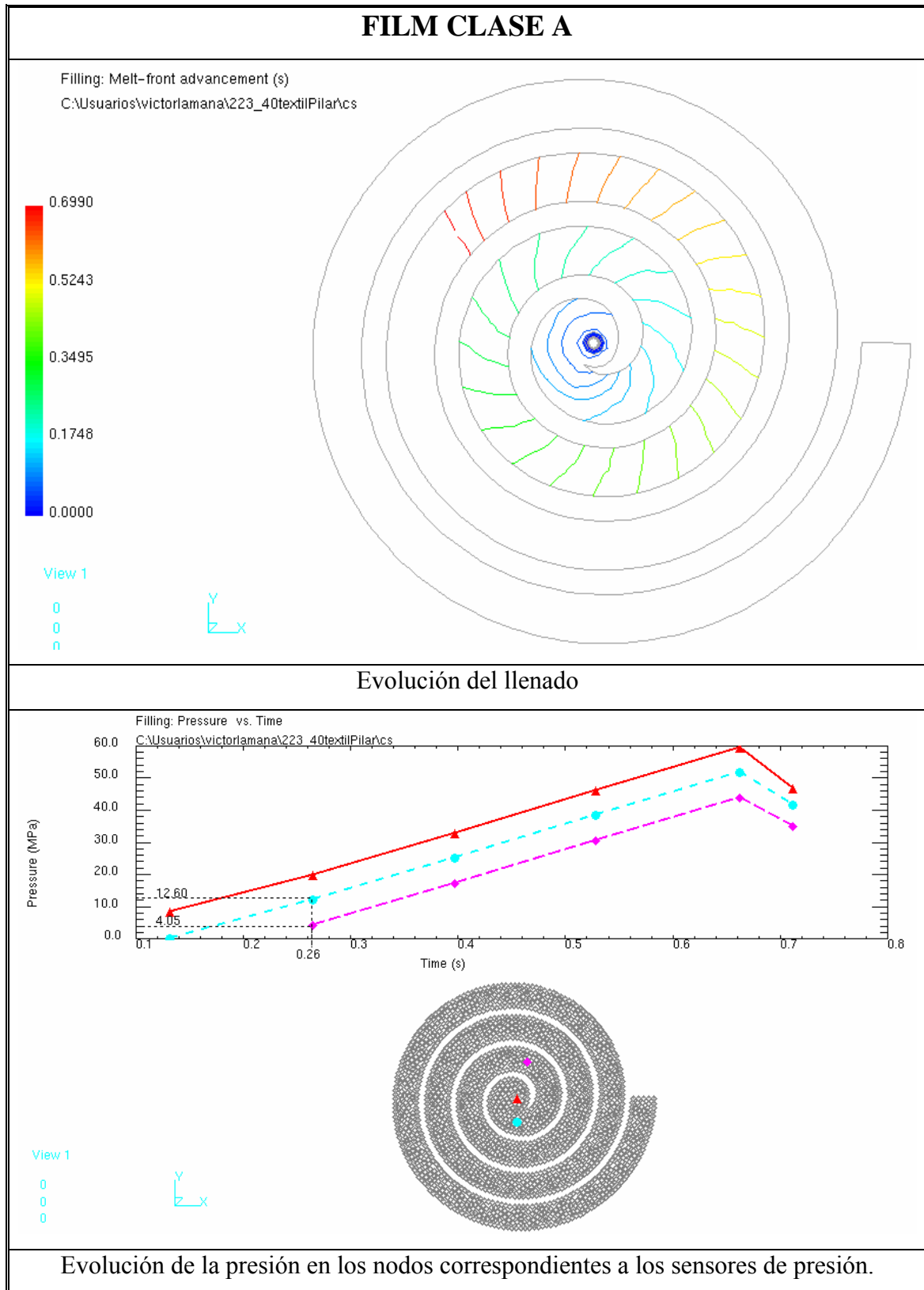
Se realizan las simulaciones de inyección con la geometría del molde espiral y los modelos viscosos correspondientes a cada uno de los films ensayados.

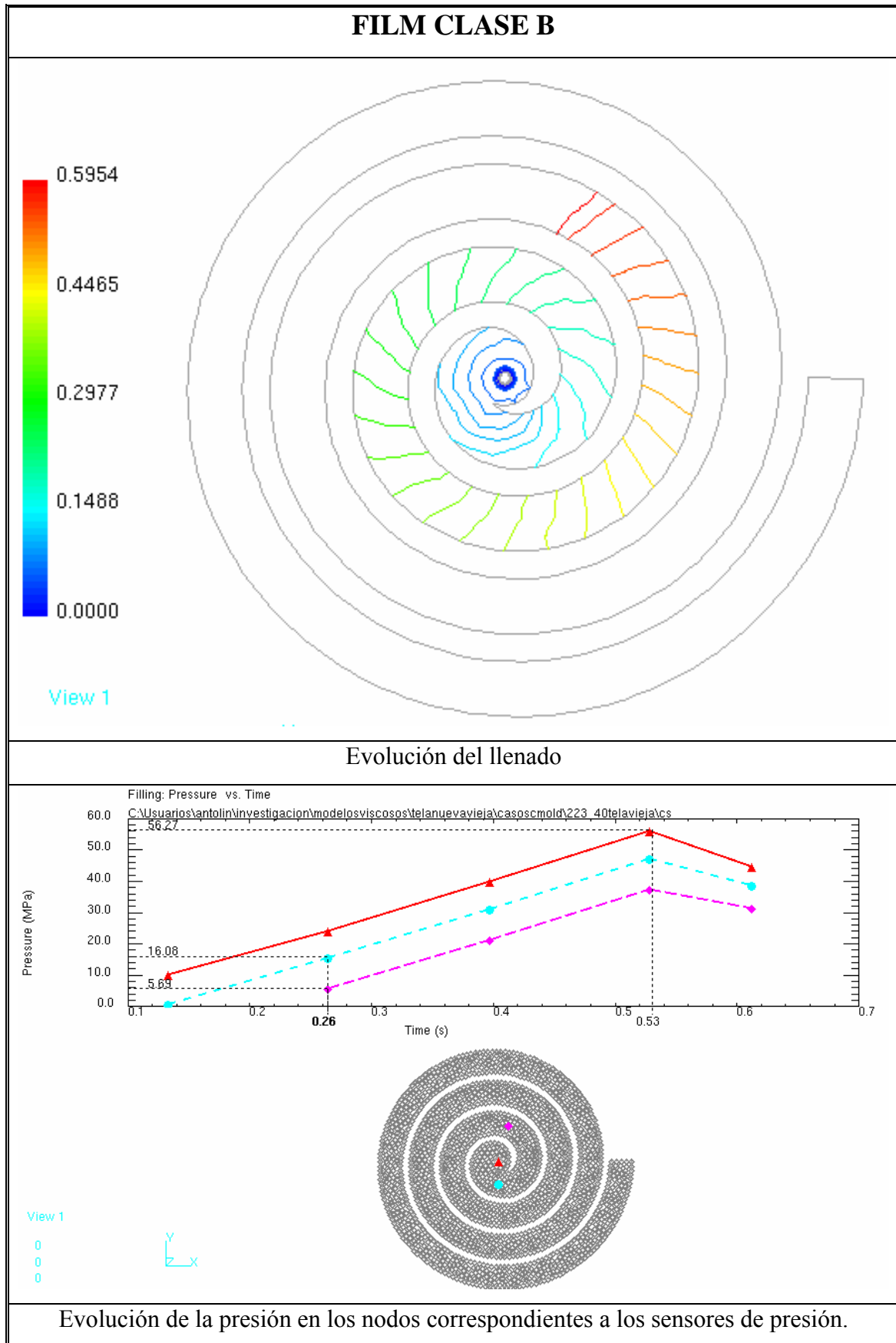
Las condiciones de proceso utilizadas para la realización de las simulaciones son las mismas que se utilizaron en los ensayos iniciales de inyección, para así poder comparar los resultados de simulación con los ensayos de inyección reales.

Los parámetros de proceso utilizados se resumen en la siguiente tabla.

<u>CONDICIONES DEL PROCESO</u>	
T^a DE INYECCIÓN	220 °C
CAUDAL DE INYECCIÓN	Se ajusta para cada caso simulado con el objeto de introducir el mismo caudal que se obtiene como resultado en las pruebas de inyección.
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
PRESIÓN MÁXIMA DE INYECCIÓN	60 MPa
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
T^a DE REFRIGERACIÓN	40 °C

De todos los resultados de simulación que se obtienen, solo se extraen los valores de caída de presión para cada uno de los modelos viscosos en los nodos correspondientes con la posición de los sensores de presión. Las caídas de presión que se obtengan de los resultados de simulación se pueden comparar con los obtenidos inicialmente en los ensayos reales de inyección.





Los valores de caída de presión recogidos de las simulaciones de inyección se comparan con los valores obtenidos en las pruebas de inyección

FILM CLASE A			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	ΔP inyección (MPa)	ΔP simulación (MPa)
220	25	7,2	8,09
	50	7,79	8,44
	75	8,38	8,55
	100	8,73	8,46

FILM CLASE B			
T^a (°C)	% VELOCIDAD	ΔP inyección (MPa)	ΔP simulación (MPa)
220	25	8,1	8,44
	50	8,3	9,23
	75	9,3	10,39
	100	9,6	9,62

Al comparar las caídas de presión obtenidas con la cadena de medida en las pruebas de inyección experimentales y las caídas de presión en la simulación utilizando los modelos viscosos equivalentes obtenidos con el método de caracterización desarrollado se observa que la diferencia entre los valores, en ambos tipos de film, es aproximadamente un 10% para valores de velocidad de inyección bajos, y el porcentaje de diferencia se va reduciendo gradualmente según se aumenta la velocidad de inyección.

Tapa 340L.

Aunque inicialmente la producción de esta tapa se realiza mediante un proceso de inyección convencional, el diseño del molde y de la pieza está realizado pensando en realizar “In-mould decoration” en un futuro.

El diseño del molde tiene ciertas características especiales que no se serían necesarias para un proceso de inyección convencional, pero si para realizar una inyección sobre lámina decorativa.

El llenado se realiza con dos puntos que llenan de forma equilibrada la pieza. La alimentación por medio de una cámara caliente que permite trabajar a bajas presiones y realizar llenado secuencial, para evitar defectos típicos que se producen en los procesos de sobreinyección, como arrugas, traspasos...

El sistema de alimentación y el de expulsión se encuentran en el lado fijo del molde lo que permite la inyección y expulsión de la pieza sin deteriorar film decorativo.

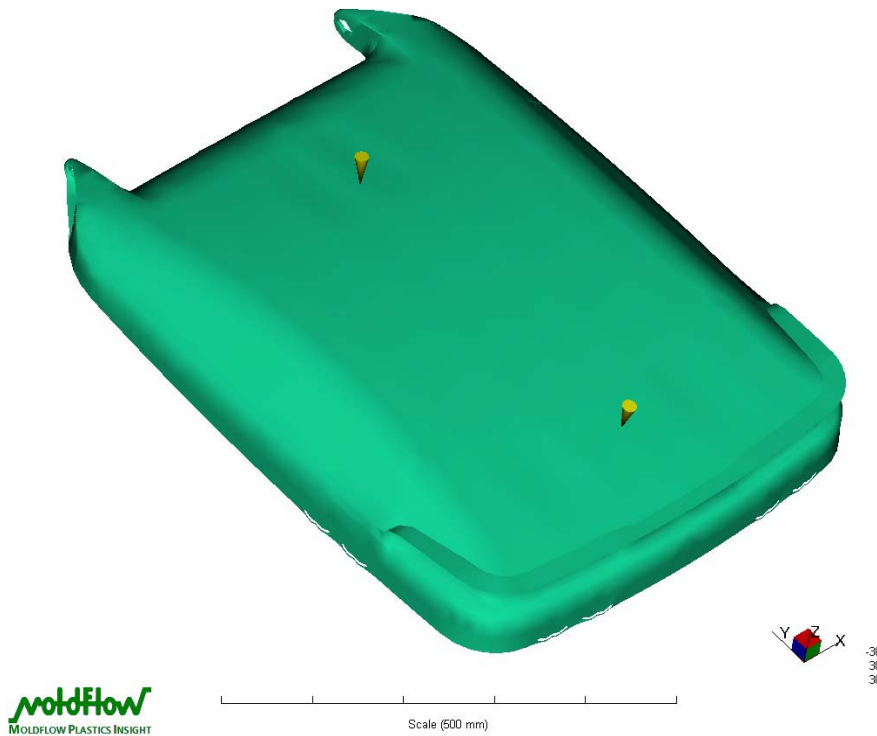


Imagen de la geometría del molde simulado.

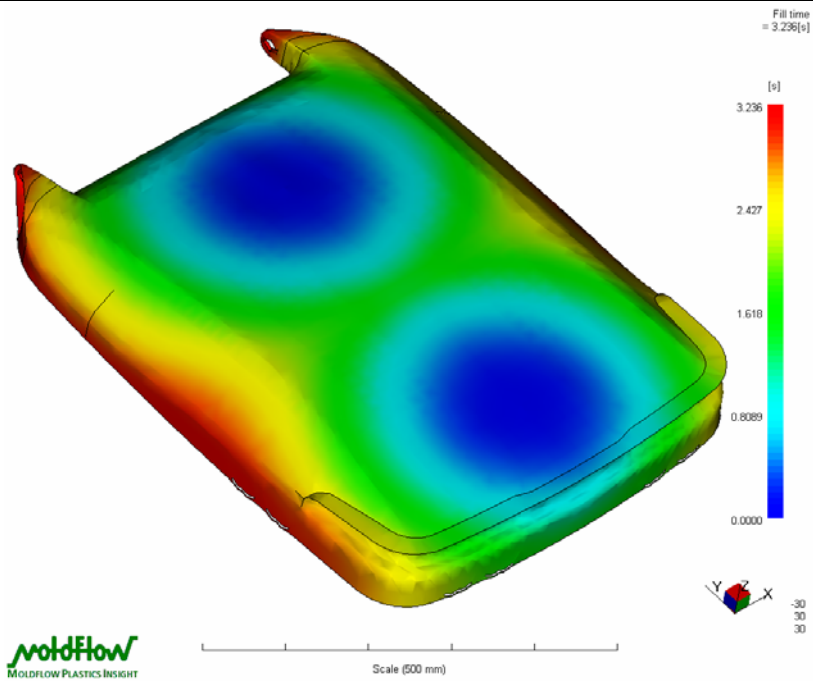
Los materiales con los que se realiza la simulación son: el modelo viscoso de la base de datos del programa de simulación del material utilizado para las pruebas experimentales, el modelo viscoso del material caracterizado con el molde espiral y los modelos viscosos obtenidos del análisis de la sobreinyección de los dos films mediante el método de cálculo desarrollado.

Los parámetros de proceso utilizados en las simulaciones se recogen en la siguiente tabla.

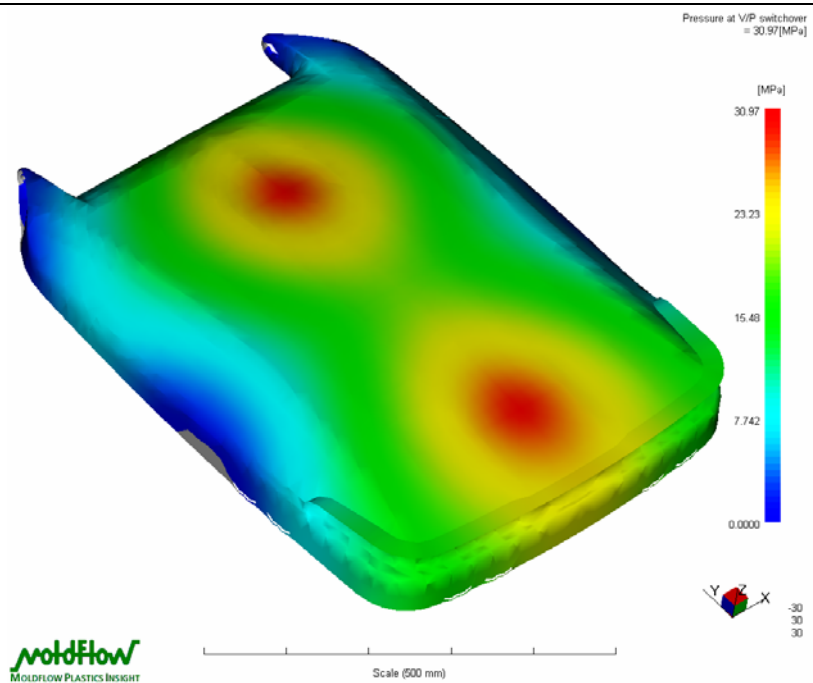
<u>CONDICIONES DEL PROCESO</u>	
T^a DE INYECCIÓN	230 ° C
TIEMPO DE INYECCIÓN	2s
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
TIEMPO DE COMPACTACIÓN	20s
PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	40 Bar
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
T^a DE REFRIGERACIÓN	40 °C
TIEMPO DE REFRIGERACIÓN	30s

A continuación se presentan algunos de los resultados más significativos de las simulaciones realizadas con cada uno de los materiales:

MATERIAL BASE DE DATOS

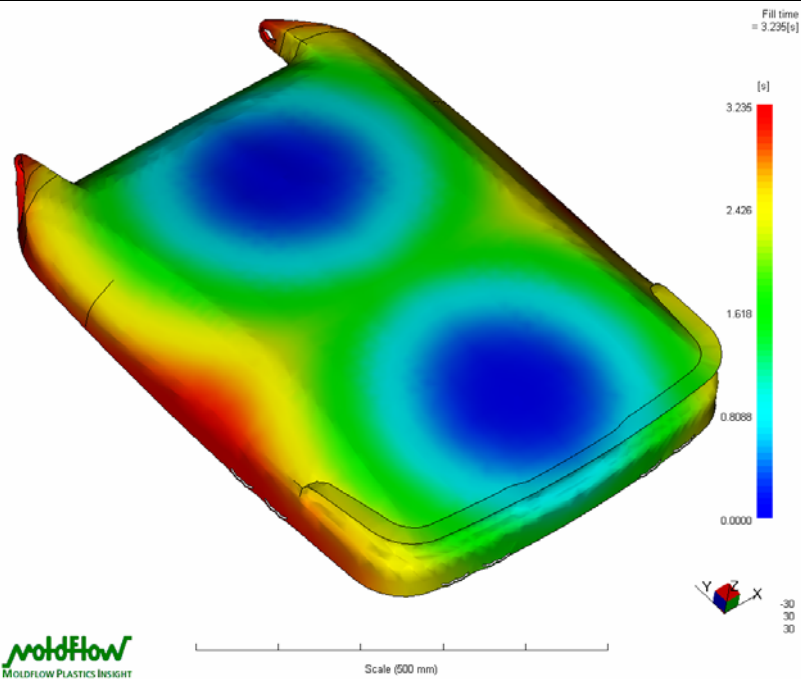


Evolución del llenado

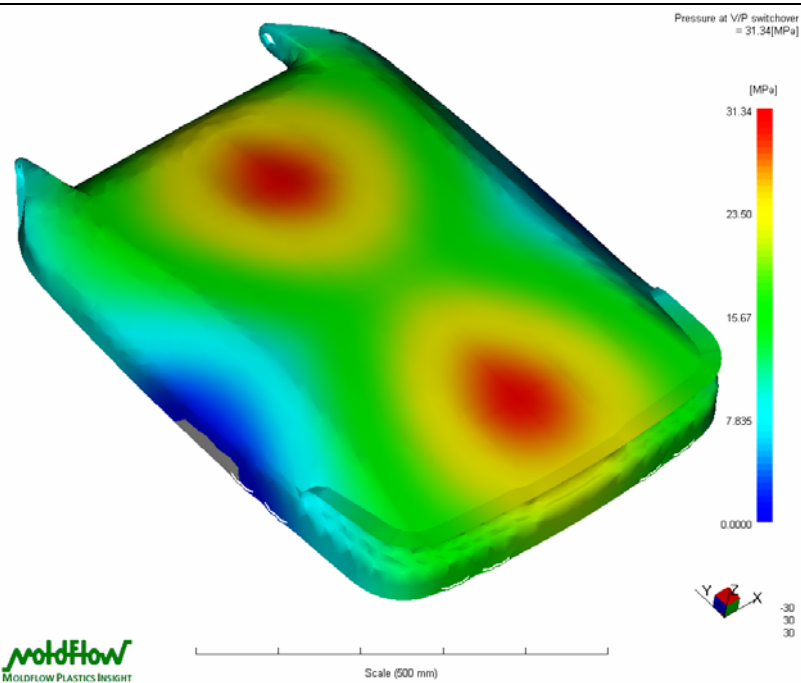


Presión en la pieza al final del llenado.

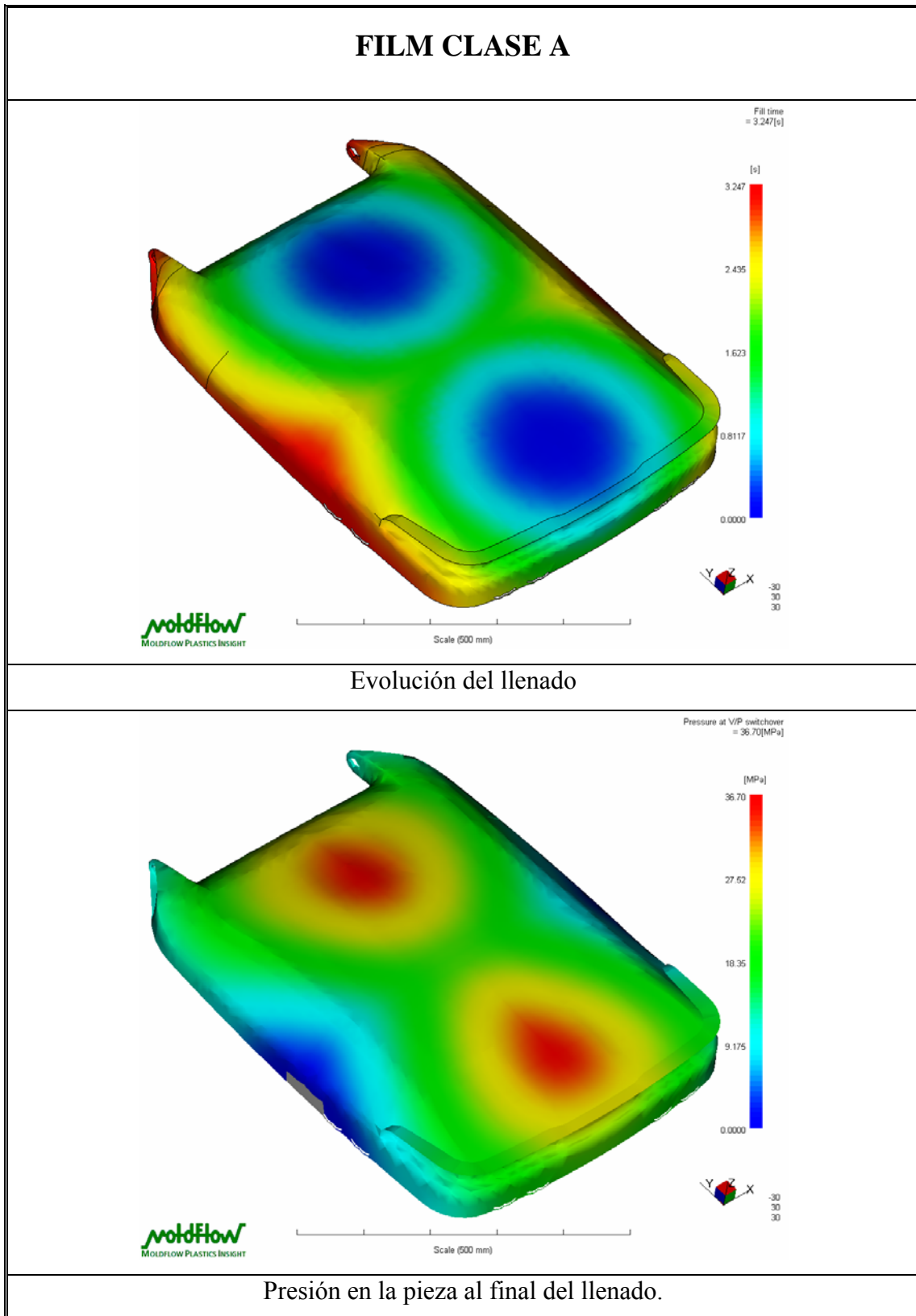
MATERIAL VIRGEN CARACTERIZADO



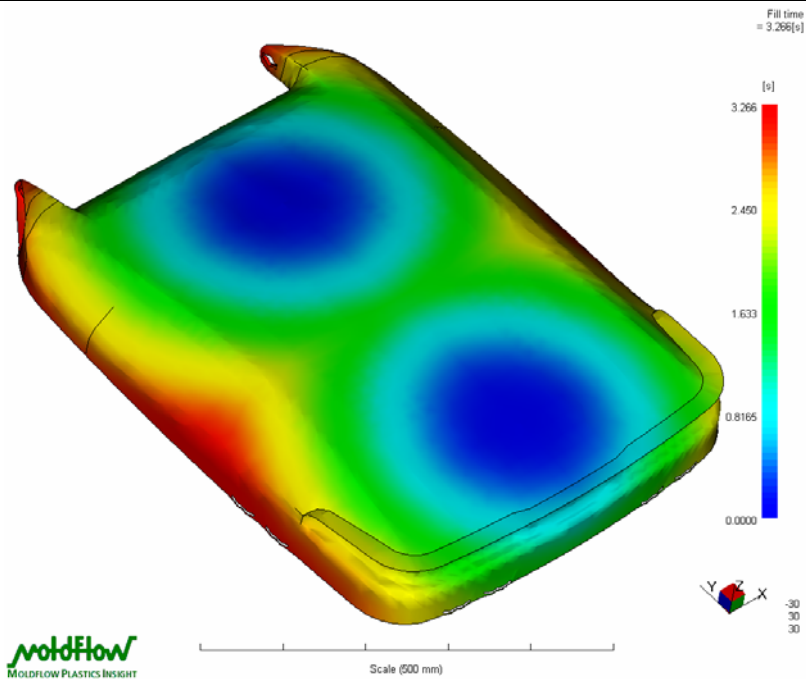
Evolución del llenado



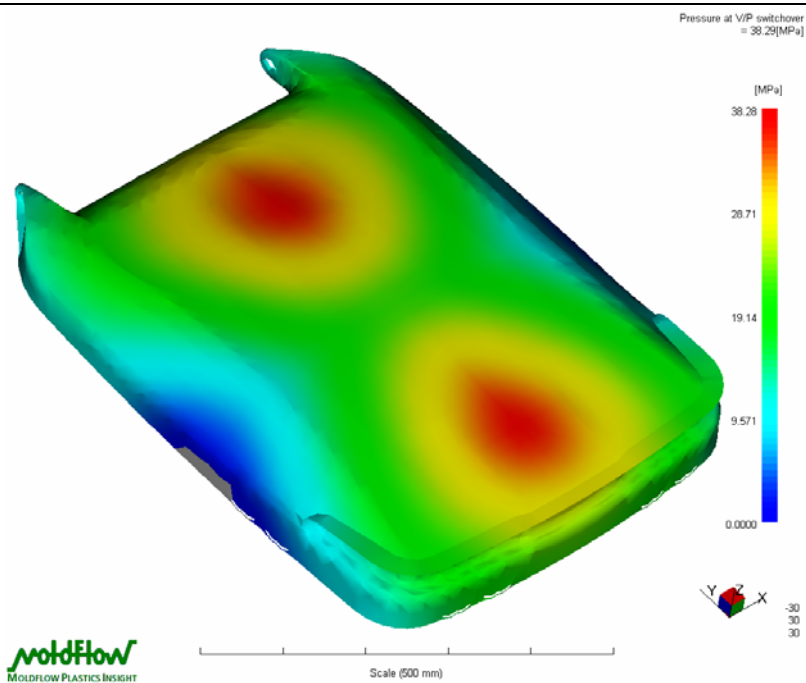
Presión en la pieza al final del llenado.



FILM CLASE B



Evolución del llenado



Presión en la pieza al final del llenado.

Esta pieza inyectada no se realiza en este material, por lo que la optimización de su geometría y espesores no está adaptada al material con el que hemos realizado los ensayos de simulación.

Por este motivo, los resultados numéricos no presentan diferencias críticas para un proceso de inyección, aunque si tendencias de evolución de los parámetros en función del material con el que se ha realizado la simulación.

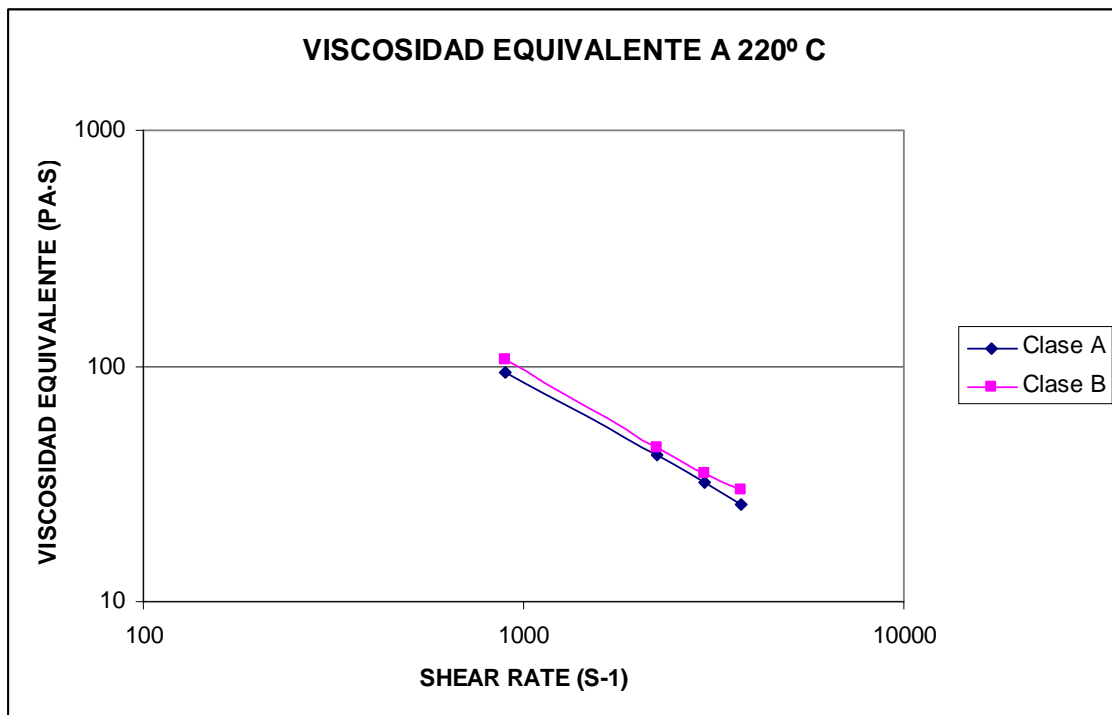
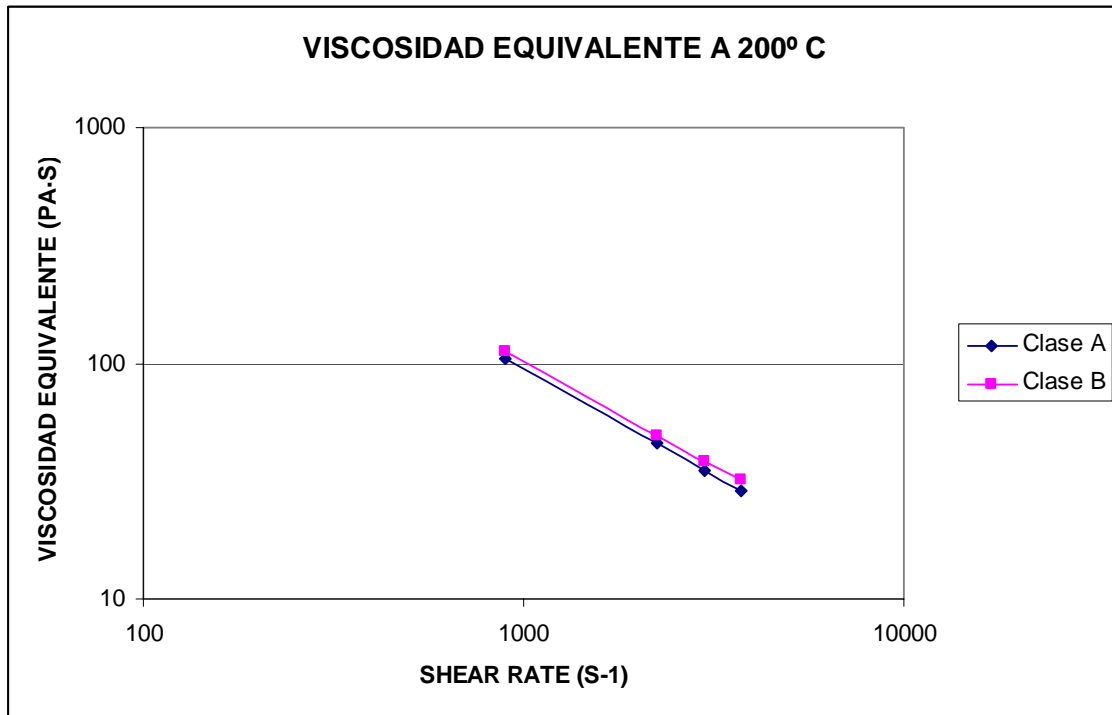
En la siguiente tabla se comparan las presiones máximas de inyección obtenidos con cada uno de los modelos viscosos analizados en simulación.

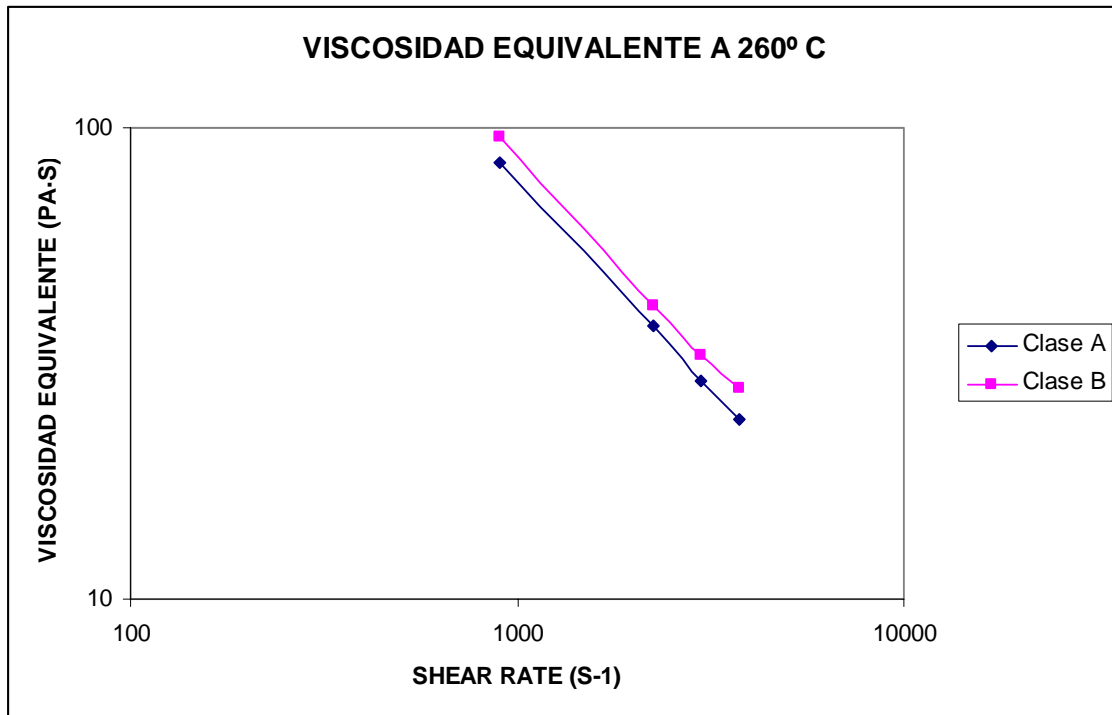
	Presión máx.de inyección (MPa)
Material base de datos	31
Material caracterizado	31
FILM Clase A	37
FILM Clase B	38

En este caso se aprecia un notable aumento de la presión de inyección trabajando con los modelos viscoso de plástico +film. Esto implica que el efecto de colocar en una de las caras del molde el film en lugar de tener metal supone una dificultad al avance del material plástico. A través de la caracterización de los conjuntos Plástico+film y de la realización de análisis de simulación se puede valorar la influencia de cada film en la distribución de presiones que se va a obtener en el molde durante el proceso de sobreinyección y ser una ayuda eficaz de cara a la validación de diseños y la prevención de traspasos originados por presiones excisivas.

6.1.6.- Análisis de resultados y conclusiones.

En las siguientes gráficas se comparan los valores de viscosidad obtenidos para los dos tipos de films analizados frente al shear rate, a las tres temperaturas que se han realizado los ensayos.





Observando las gráficas se aprecia como la introducción de un film altera el flujo de un material en el interior de un molde, reológicamente conocido. También se aprecia claramente que en función del tipo de lámina o film que se introduzca en el interior del molde para realizar la sobreinyección, la viscosidad equivalente del material inyectado varía de forma diferente.

Si analizamos los valores numéricos de viscosidad obtenidos para cada film y las gráficas mas en profundidad, comprobamos que para el film de clase B, la viscosidad equivalente es entre un 10% y un 15% mayor que para el film de clase A, en función del shear rate pero independientemente de la temperatura a la que se realice la comparación.

El espesor del film no afecta a la viscosidad equivalente del material, ya que al situarse en el plano de cierre del molde no afecta a la sección de paso que queda libre en el molde para el plástico que se inyecta. Las espirales de plástico inyectadas sobre los dos tipos de films mantienen el espesor de 2mm, que es el espesor de la pieza inyectada de forma convencional.

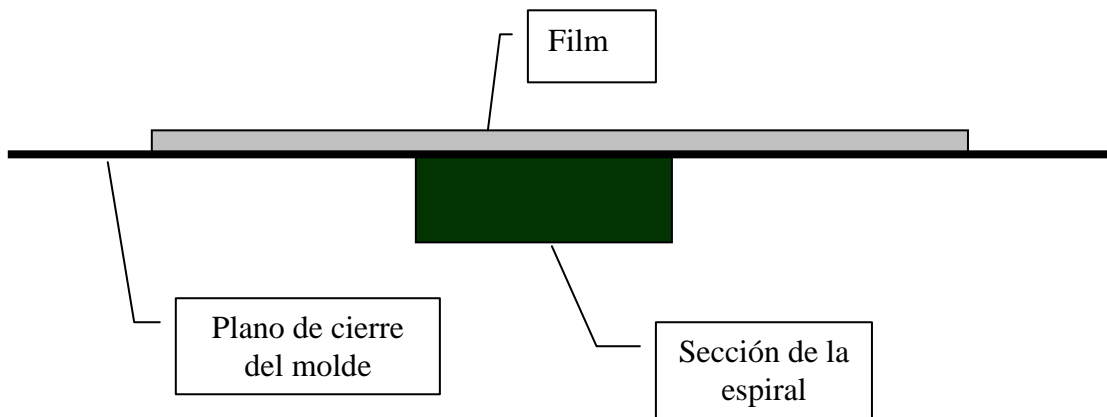


Fig. Esquema de la sección del plástico y el film en el molde.

El aumento de viscosidad que se observa de un tipo de film a otro se debe a;

- La diferencia de textura entre ambos, lo que provoca una mejor facilidad o no para fluir sobre el film, que siempre es superior a la superficie pulida del acero del molde.
- La diferencia de energía necesaria para comprimir cada film.
- La conductividad térmica de cada film....

T ^a (°C)	S. RATE (s ⁻¹)	ΔP (Pa)	
		FILM Clase A	FILM Clase B
220	2000	46,1	50,9
	6000	17,1	19,3
	9000	11,8	13,5
	15000	7,4	8,7
240	2000	41,6	46,5
	6000	15,6	17,6
	9000	10,8	12,3
	15000	6,8	7,9
260	2000	37,3	42,0
	6000	14,1	15,8
	9000	9,8	11,0
	15000	6,2	7,1

Se puede decir que la inyección de plástico sobre una lámina o film afecta al comportamiento reológico del material aumentando su viscosidad.

6.2.- APLICACIÓN A MOLDES TEXTURIZADOS

Los moldes texturizados se utilizan para dar a la pieza un acabado estético, por lo que generalmente solo se suelen aplicar en una de las caras del molde, en la que se corresponde con las superficies vistas de las piezas.

El texturizado que se aplica a una superficie de una pieza afecta al flujo en el interior del molde del material inyectado por varios motivos;

a).- El tipo y grado de texturizado de la pieza

En función del tipo y grado de texturizado que se aplique a la pieza, el espesor general no es constante, es decir varía a lo largo de la sección de la pieza.

Si representamos de forma macroscópica la sección de una pieza texturizada, obtendríamos una figura similar a la que a continuación se representa.



Fig. Representación de la sección real de una pieza texturizada.

Cuando esta sección se representa mediante una malla de elementos finitos, el espesor de la pieza se uniformiza por lo que la geometría real con la geometría simulada no se corresponden.



Fig. Representación de la sección simulada de una pieza texturizada

Conforme mayor sea el texturizado que se aplique, en mayor medida se verá afectada la viscosidad del material y como consecuencia los parámetros de proceso.

b).- La diferencia de rugosidad entre las dos caras interiores del molde.

La rugosidad de la superficie interna de la cavidad afecta al flujo del plástico en el interior del molde, ya que una superficie pulida no ofrece la misma resistencia al plástico que una superficie rugosa.

Por otro lado, la diferencia de rugosidad que generalmente se produce entre las dos caras de la cavidad del molde, ya que por lo general solo una de las superficies es rugosa, afecta directamente a la distribución de la velocidad del flujo a lo largo de la sección de avance del material, y por lo tanto a la viscosidad del material.

Estos factores expuestos afectan a la viscosidad del material durante el proceso de inyección y ningún programa de simulación tiene una aplicación que los tenga en cuenta.

Con el método de caracterización desarrollado en este trabajo se podría calcular un modelo viscoso equivalente para cada material inyectado sobre su textura correspondiente. Esto permitiría realizar simulaciones de inyección teniendo en cuenta este efecto.

La forma de realizar el cálculo del modelo viscoso de moldes texturizados sería mecanizando la textura que se quiera analiza una de las caras del molde espiral.

El inconveniente de esta caracterización para no condicionar el molde espira al análisis exclusivo de una textura, es que sería necesario realizar distintas placas de uno de los lados del molde con la espiral mecanizada con distintas texturas. De esta forma tendríamos la placa original del molde espiral y placas con distintas texturas para utilizarlas aleatoriamente en función del caso a caracterizar en cada momento.

6.3.- APLICACIÓN A GEOMETRÍAS COMPLICADAS DE MODELIZAR

Para la realización de un análisis de simulación es necesario realizar una representación geométrica de la pieza sobre la que se quiere realizar el estudio.

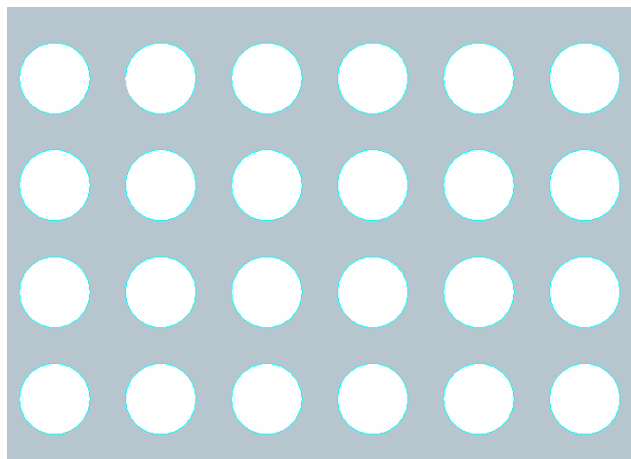
Esta representación, como se ha explicado en capítulos anteriores, se basa en la modelización de la geometría a partir del plano medio al que se le asignan diferentes espesores.

Esta simplificación en la modelización de la geometría se debe a que los programas de simulación necesitan una geometría de elementos finitos sobre la que aplicar las ecuaciones de flujo.

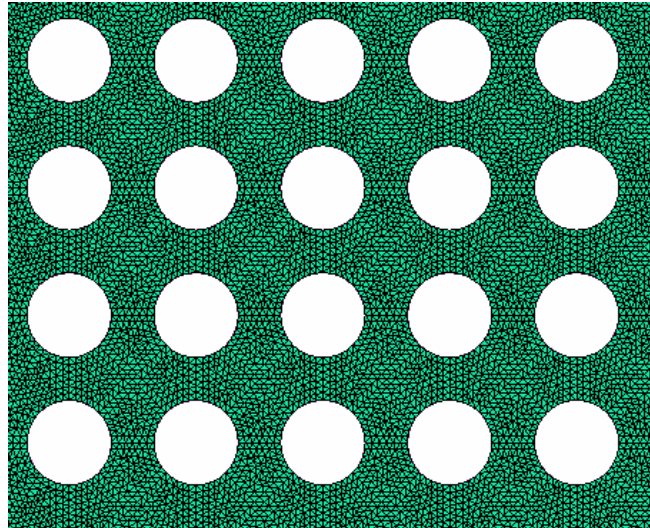
Existen ciertas geometrías que su representación para realizar análisis de simulación es complicada y en ciertos casos nunca llegan a representar la geometría original. Esto supone que el estudio de simulación realizado no puede ofrecer resultados fiables ya que no se corresponde con la geometría original.

a)- Geometrías de “tipo rejilla”

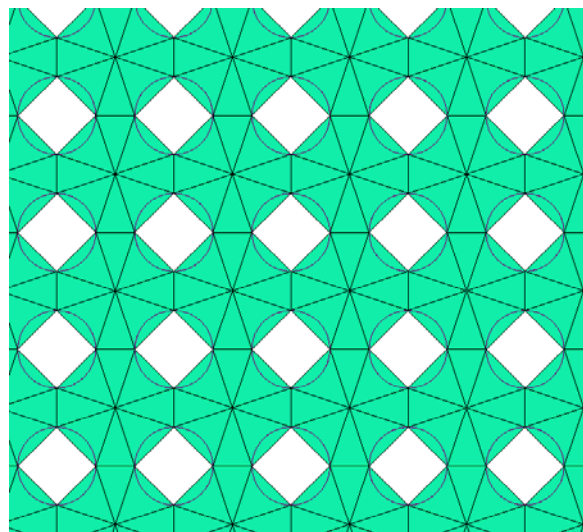
Las geometrías de “tipo rejilla” pueden representarse fácilmente con una geometría basada en el plano medio, pero cuando se crea la geometría de elementos finitos esta se ve alterada.



Si se utiliza un tamaño de malla muy pequeño para que la geometría parezca representativa, se aumenta enormemente el número de nodos sobre los que se realizan los cálculos, por lo que cada caso de simulación tarda mucho tiempo en ofrecer los resultados. En este caso perderíamos la eficacia y rapidez de análisis que los programas de simulación ofrecen.



Si se utiliza un tamaño de malla intermedio o grande, la malla de elementos finitos no se corresponde con la geometría de la pieza que se quiere analizar, por lo que los resultados que se obtengan no tendrán la misma fiabilidad que un análisis donde la malla simulada se corresponda con la geometría original.



b)- Secciones “Tipo sierra”

Hay otras geometría complicadas de modelizar con un modelo geométrico del plano medio, pero no por el tamaño de malla, sino al aplicar los distintos espesores y como estos determinan la sección de la pieza. Estas geometrías son las denominadas tipo sierra, como los ejemplos que se muestran en las siguientes imágenes.

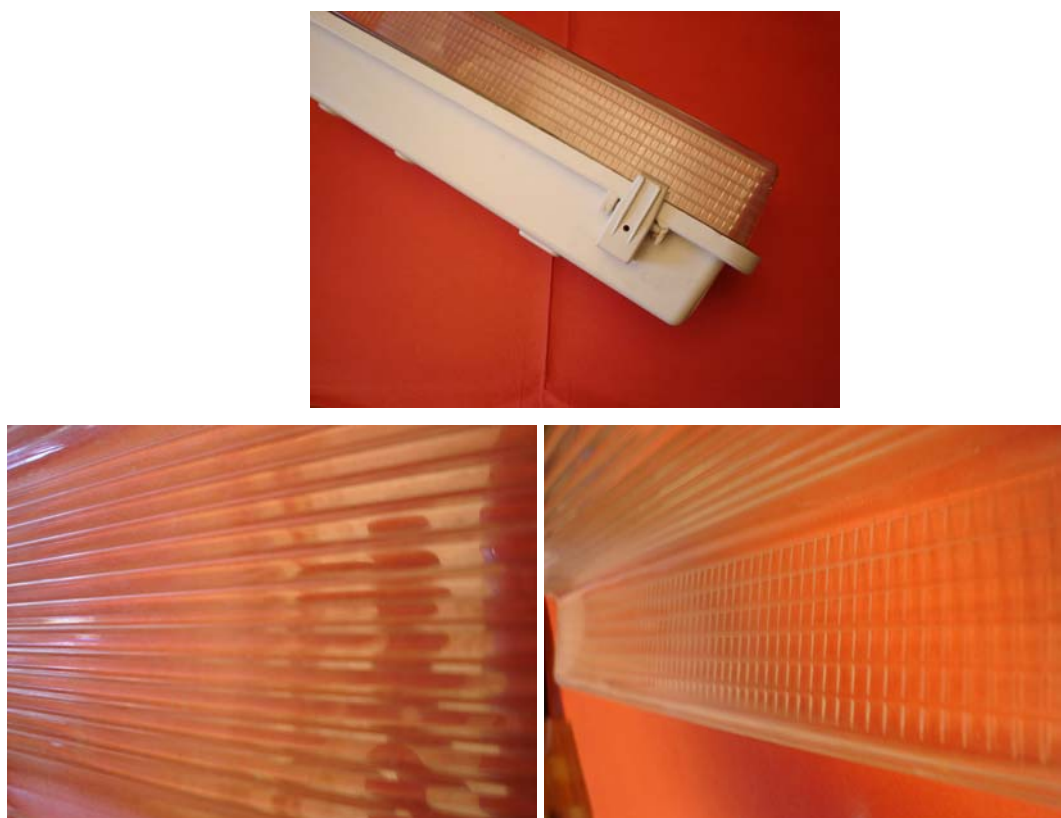


Fig. Imagen y detalles de la parte traslucida de la luminaria.

Cuando este tipo de geometrías se representan por un modelo geométrico de plano medio al que se le asignan espesores, la sección que en realidad representan es la que se muestra en la siguiente figura y que no se corresponde con la sección de la geometría de la pieza original que se quiere analizar.



Para estos casos de geometrías difíciles de modelizar también se puede utilizar el método de caracterización desarrollado, para permitir su análisis de simulación de una forma fiable.

El procedimiento inicial sería igual que en el caso de los moldes texturizados, sería necesario mecanizar la huella de la espiral donde se encuentran los sensores de presión con la geometría característica que se quiere analizar.

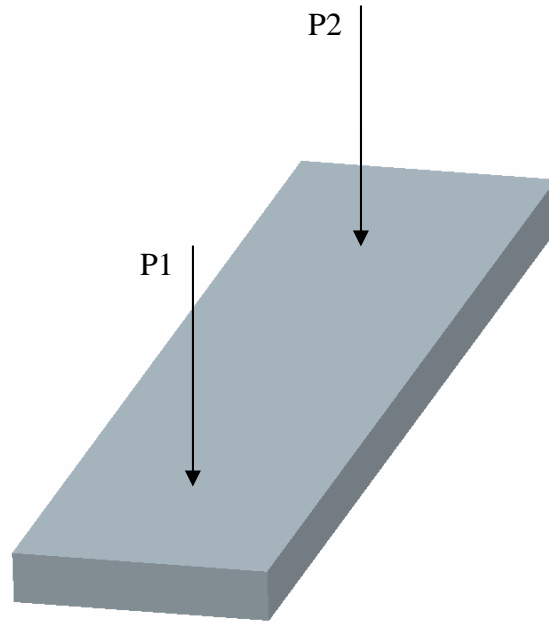
Con los resultados de presión y tiempo que se obtienen de los ensayos se calculan los modelos viscosos equivalentes para cada geometría.

Este tipo de geometrías no suelen estar extendidas a lo largo de toda la pieza, sino que se sitúan en zonas concretas de la pieza. Por este motivo no se puede aplicar el modelo viscoso calculado a la totalidad de la pieza.

Se debe calcular con el modelo viscoso obtenido un espesor equivalente a la geometría analizada con el método de cálculo desarrollado. Mediante simulaciones de inyección de una geometría sencilla (una placa plana), se debe obtener un espesor que inyectado con el material de la base de datos de una caída de presión igual a la misma geometría analizada con el modelo viscoso obtenido con el molde espiral.

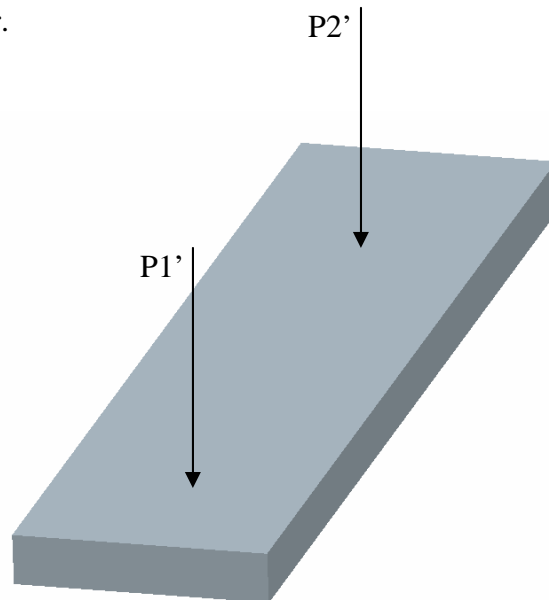
A continuación se explica el procedimiento para la obtención de espesor equivalente más detalladamente.

Se modeliza una placa plana de espesor igual al espesor general de la pieza que se quiere analizar en simulación de inyección. Se simula su inyección con el material de la base de datos que se corresponde con el material utilizado en la inyección real, y se recoge como resultado la caída de presión que existe entre dos puntos de la geometría analizada



$$\underline{\Delta P = P2 - P1}$$

A continuación se simula la inyección de la misma placa plana pero con el modelo viscoso obtenido a través del método desarrollado con el molde espiral. Se recogen de los resultados de simulación la caída de presión entre los dos mismos puntos que en el caso anterior.

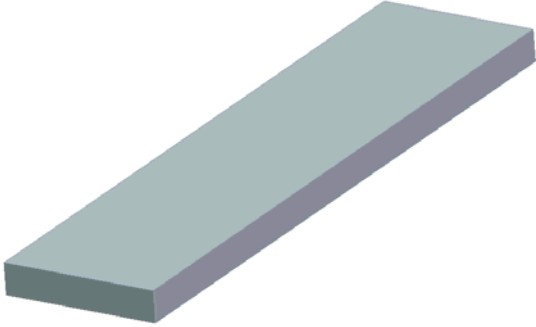
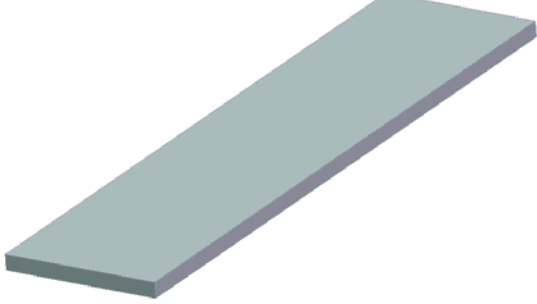


$$\underline{\Delta P' = P2' - P1'}$$

Las caídas de presión obtenidas de los dos modelos viscosos analizados no son iguales.

$$\underline{\Delta P \neq \Delta P'}$$

Para obtener el espesor equivalente a la geometría difícil de modelizar se debe ir modificando el espesor de la placa simulada, hasta conseguir que la caída de presión que se produce con el material de la base de datos sea la misma que con el modelo viscoso de la geometría ensayada.

	
<p>Placa con espesor original y ensayada con el material de la base de datos</p>	<p>Placa con el espesor equivalente y ensayada con el modelo viscoso obtenido</p>
<p><u>$\Delta P = \Delta P'$</u></p>	

De esta manera, mediante la caracterización con el molde espiral de la geometría complicada de modelizar, se obtiene un espesor equivalente aplicable a la geometría de la pieza que permite la simulación de inyección de la pieza total con el material de la base de datos, aplicando el espesor equivalente en la zona en la que se sitúa la geometría complicada.

7.- NUEVO MOLDE ESPIRAL

A partir del estudio realizado en el que se ha comprobado la utilidad del método de cálculo de modelo viscoso desarrollado para diferentes aplicaciones, se plantea la posibilidad de desarrollar un nuevo molde espiral que aumente las posibilidades de cálculo de modelos viscosos equivalentes para geometrías complejas y diferentes texturas.

El nuevo molde debe permitir el análisis de la influencia de ciertos factores que afectan al comportamiento viscoso del plástico inyectado, y que por los motivos que se han explicado anteriormente, no pueden simularse con las opciones que ofrecen los programas de simulación que actualmente hay en el mercado.

CONDICIONES INICIALES

Los parámetros y los nuevos requisitos que se deben tener en cuenta en el diseño de este nuevo molde son:

- Influencia de la viscosidad del plástico:

La nueva herramienta debe ser válida para la aplicación del método desarrollado para caracterización reológica, de la misma manera que se aplica en el molde espiral.

Se deben situar dos sensores de presión en el primer tramo de la pieza para que la pérdida de temperatura que sufre el material en el interior del molde sea mínima, y la aplicación del método desarrollado sea válida.

Sería interesante que el primer tramo de la pieza fuese recto, ya que los resultados obtenidos serían más precisos que en tramo curvo. Hay que recordar que en el método de cálculo desarrollado el tipo de geometría que se toma para el cálculo de la viscosidad es el de una placa plana.

- Variación de espesores:

El molde debe ofrecer la posibilidad de variar los espesores de la pieza dentro de un rango representativo, se plantea inicialmente entre un mínimo de 1mm y un máximo de 5mm. De esta manera se puede evaluar la influencia del espesor en el flujo del material analizado.

- Análisis de la influencia de superficies texturizadas:

Muchas de las piezas de plástico inyectado que hoy en día existen en el mercado tienen algún tipo de texturizado. Este parámetro determina el aspecto estético de la pieza y hoy en día, no hay ninguna herramienta disponible que nos permita analizar su influencia en el proceso de inyección.

El nuevo molde debe permitir evaluar la influencia de diferentes texturas en el proceso de inyección.



Superficie texturizada

- Análisis de la influencia y validación de diseño de geometrías “tipo rejilla”:

Las geometrías tipo rejillas suponen problemas tanto en la realización de la simulación de la inyección como en su posterior inyección., tal y como se han explicado en apartados anteriores.

El nuevo molde diseñado debe poder resolver el problema de simular este tipo de geometrías.

Para conseguir toda esta versatilidad en un mismo molde, es necesaria la utilización de postizos intercambiables, que permitan la modificación de la figura de la pieza en el tramo de análisis que es donde se sitúan los sensores de presión, en función del parámetro que se quiera analizar en cada momento.

Estos postizos serán insertados en unas placas que se sitúan tanto en el lado fijo del molde como en el lado móvil. Estas placas hacen funciones de bastidor para los distintos insertos.

El sistema de postizos mecanizados permite cumplir con todos los requisitos expuestos en cada uno de los parámetros anteriores.

Para cumplir estos objetivos se va a plantear dos diseños de molde con campos de aplicación diferentes. Se plantea un primer molde espiral con un gran recorrido de flujo, superior al molde actual, que además de ser válido para la aplicación del método de caracterización reológica, se puede utilizar como molde espiral tradicional y como molde experimental para analizar el comportamiento de los materiales plásticos frente a diferentes geometrías singulares; nervios, bisagras, líneas de soldadura etc. El segundo diseño de molde es una versión reducida del molde espiral válida únicamente para la aplicación del método de caracterización desarrollado. Este segundo molde tiene como huella únicamente la parte inicial del molde espiral, donde van situados los sensores de presión.

PRIMER DISEÑO: NUEVO MOLDE ESPIRAL

Una vez determinados todos los requisitos que debe cumplir el nuevo molde, se procede a la determinación de una geometría de pieza que satisfaga los requisitos anteriores y permita el uso del sistema de postizos intercambiables.

El tamaño del molde y con él, el de la geometría de la pieza, está limitado por las máquinas disponibles en los lugares de ensayo. Se toma como referencia la máquina de inyección Mateu&Sole Meteor 55, disponible en las instalaciones del grupo de investigación.

También hay que tener en cuenta que conforme mayor sea el tamaño de la máquina de inyección que se utilice en las pruebas, mayor cantidad de material es necesario para cada prueba sin que por ello los resultados obtenidos sean mejores. Por este motivo principalmente, además del de la disponibilidad de máquina de inyección, se diseña el molde para que pueda ser inyectado en una máquina de poco tonelaje.

Por estos motivos, las dimensiones máximas de molde quedan limitadas a 355mm de anchura, 525mm de longitud y 400mm de espesor.

Para facilitar y abaratar la construcción del molde se trabaja con placas normalizadas, y tras consultar catálogos de distintos fabricantes se determina utilizar un molde de placas SP tipo 346mmx446mm con una altura del conjunto cerrado de 336mm.

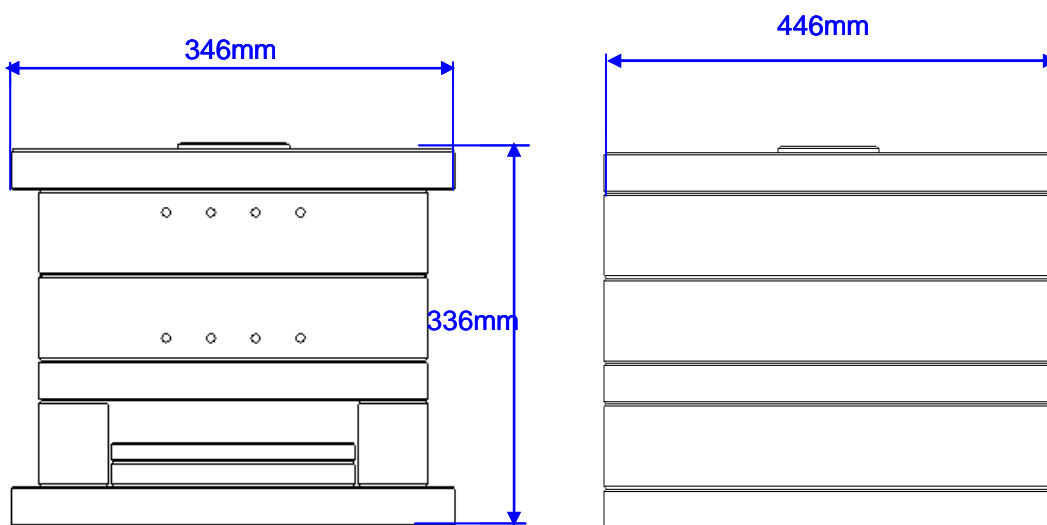


Fig. Dimensiones del molde



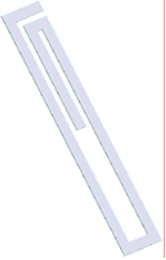
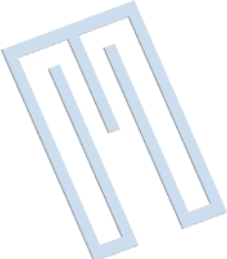

Geometría de la figura

Con este tamaño de molde, y teniendo en cuenta que es necesario mecanizar un cajeadado para intercambiar los insertos, el espacio disponible para la geometría de la figura es de 240x500mm.

La geometría de la pieza debe ser sencilla para que el intercambio y la mecanización de postizos no sea una tarea compleja. Para ofrecer la mayor versatilidad posible a la hora de realizar análisis, se determina que la pieza debe tener la forma de una espiral rectangular con las esquinas redondeadas

Se plantean diferentes geometrías, todas ellas basadas en la forma de una espiral rectangular, con el fin de determinar cual de ellas es la óptima.

En la siguiente tabla se presenta la comparación de las geometrías propuestas.

COMPARATIVA DE GEOMETRÍAS		
GEOMETRÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
	Ocupa poco espacio Espacio libre alrededor de la espiral	Recorrido muy escaso Poco espacio libre dentro de la espiral
	Espacio libre dentro de la espiral	Recorrido escaso Ocupa espacio Poco espacio libre alrededor de la espiral
	Ocupa poco espacio Tramos rectos muy largos	Recorrido escaso Demasiado estrecha Nada de espacio libre dentro de la espiral
	Recorrido largo Permite varias posibilidades Muchos tramos rectos	Complica la geometría base No es práctica la bifurcación de flujos
	Recorrido muy largo Muchos tramos rectos y largos	Poco espacio libre alrededor de la espiral Poco espacio libre dentro de la espiral

Se determina como mejor geometría la última opción presentada en la tabla anterior.

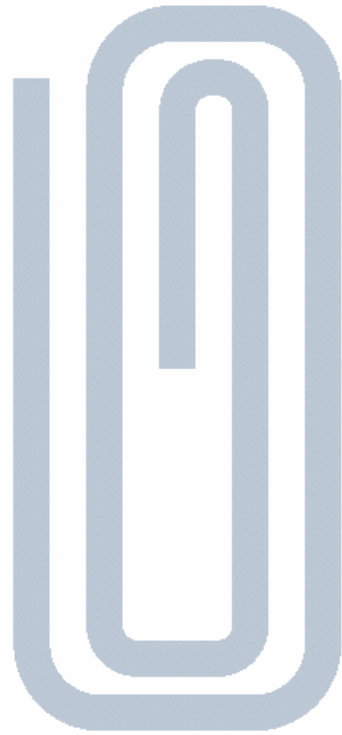


Fig. Geometría de la espiral rectangular

Es una figura equilibrada dentro de la superficie total del molde, con una longitud de recorrido total de 1865mm, con las esquinas de los rectángulos redondeadas.

Dispone de un tramo recto en el inicio de la pieza, donde se colocan los sensores de presión para permitir la aplicación del método de cálculo de modelo viscoso desarrollado.

La huella de la pieza incluye marcas de longitud cada 10mm y cada 100mm a lo largo de toda la pieza, para controlar la longitud del flujo fácilmente.

Las marcas cada 10mm son de bajo relieve y se marcan numéricamente cada 10, y las marcas cada 100mm sobresalen del relieve 0,5mm y la marca numérica se coloca en posición horizontal a la figura.

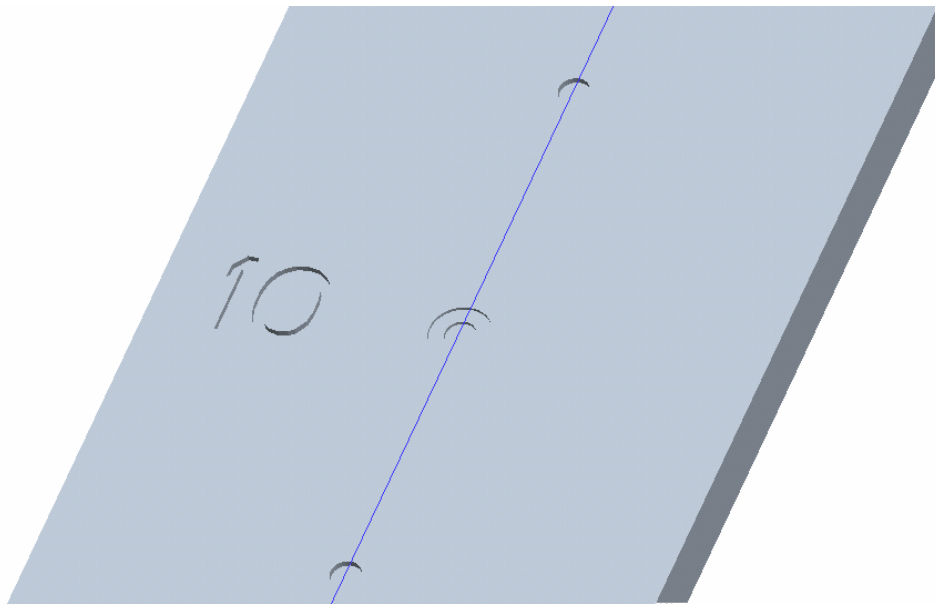


Fig. Marcas de longitud de flujo cada 10mm.

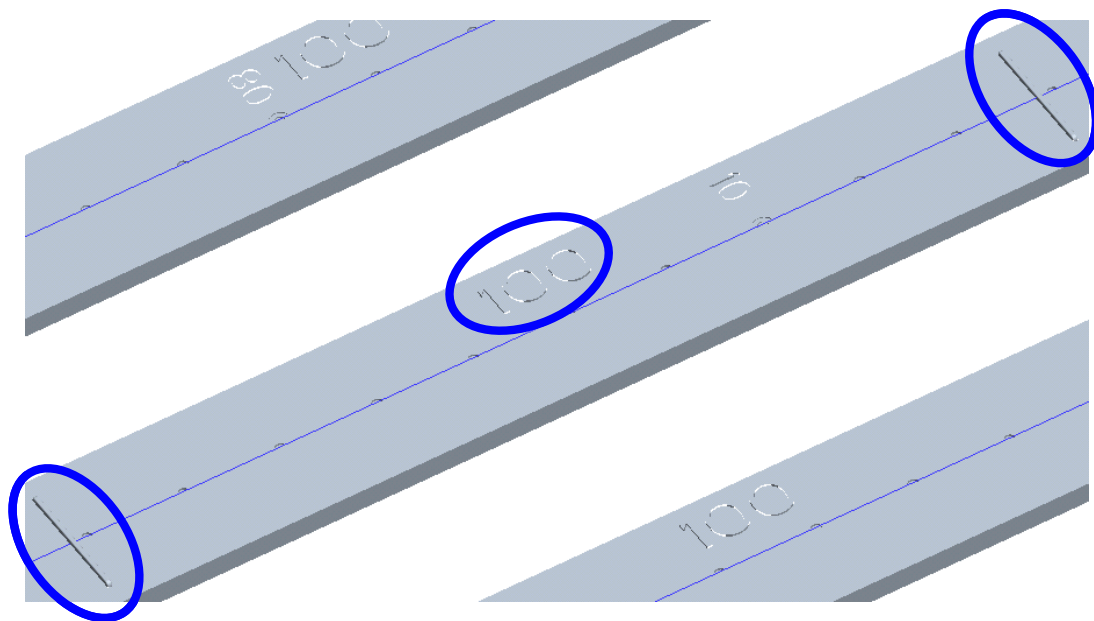


Fig. Marcas de longitud de flujo cada 100mm

El molde se diseña con un cajeado para la inclusión de distintos insertos en función del tipo de parámetro que se quiera analizar en cada momento. Para ofrecer la mayor versatilidad, la inserción de inserto se posibilita tanto en el lado fijo como en el lado móvil del molde.

Los postizos son una placa de 220x410x76mm donde se puede mecanizar cualquiera de las posibilidades expuestas anteriormente.

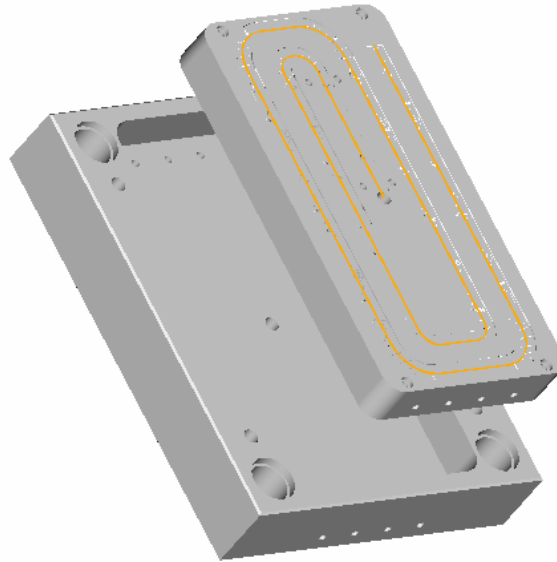


Fig. Inserto con la figura mecanizada dentro de la placa base.

Los distintos insertos que se preparan para cumplir cada uno de los requisitos impuestos se presentan a continuación.

- Influencia de la viscosidad del plástico:

Para la aplicación del método de cálculo de modelos viscosos desarrollado en apartados anteriores, es necesario situar dos sensores de presión en el primer tramo recto de la pieza, con el objetivo de obtener resultados más fiables que en tramos curvos.

Con la caída de presión que se registra entre los dos sensores de presión, y con las condiciones de inyección impuestas, se calculan valores de viscosidad, y a partir de estos valores, se caracteriza el comportamiento viscoso del material y geometría analizada.

Este primer tramo recto, donde se sitúan los sensores de presión, va empostizado para permitir el análisis de diferentes texturas y geometrías tipo “rejilla”.

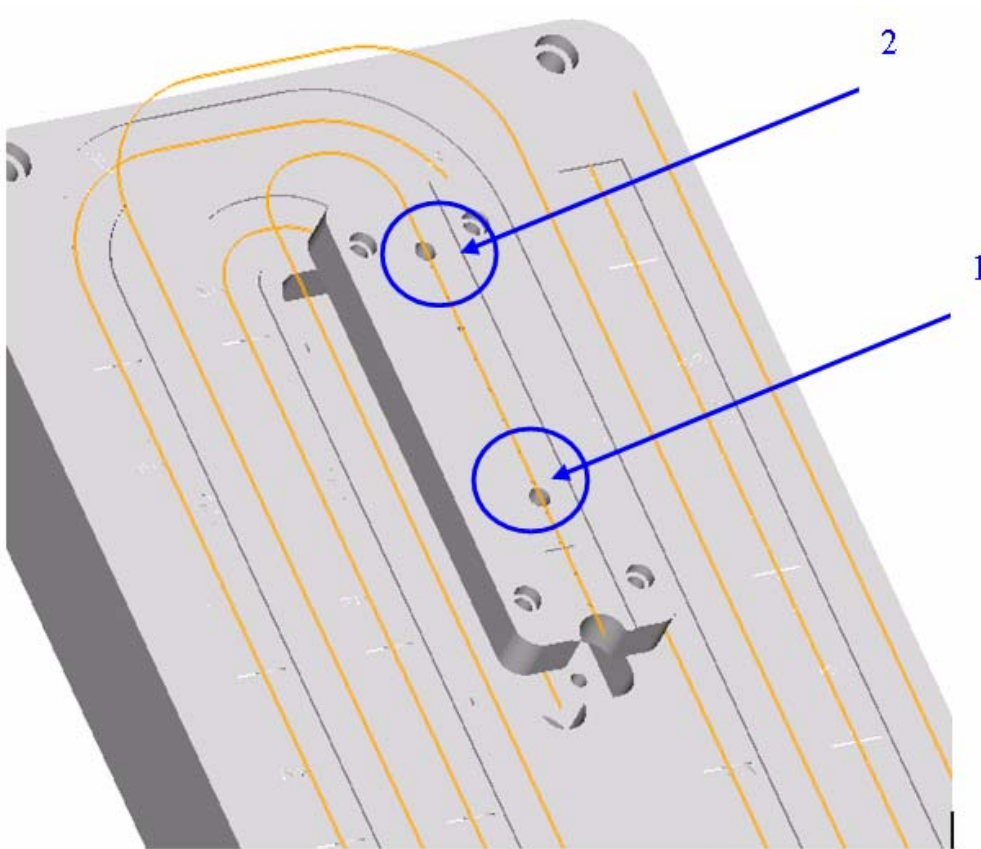


Fig. Situación de los sensores de presión en la huella del molde.

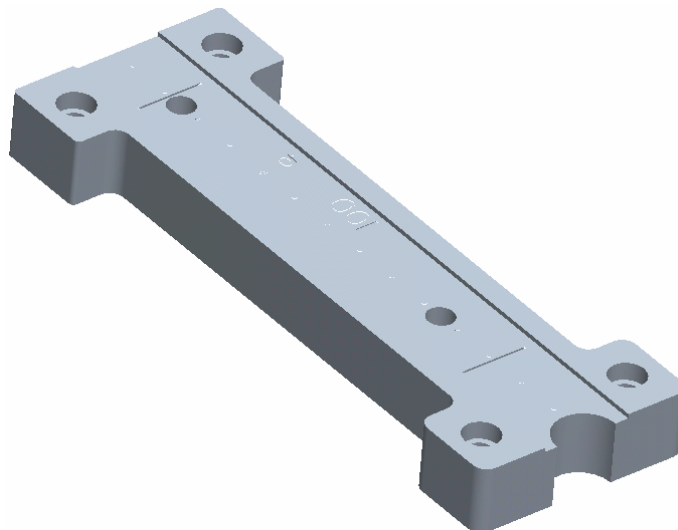


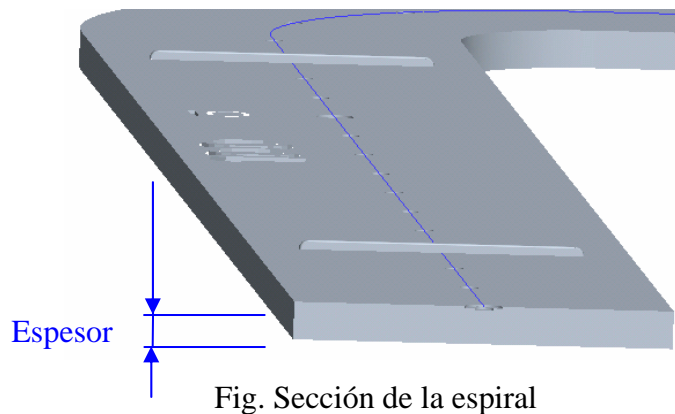
Fig. Postizo central intercambiable para poder cubrir todos los requisitos impuestos inicialmente.

- Variación de espesores:

La variación del espesor de la espiral se realiza mediante la modificación de uno de los insertos. Se fija el espesor de la huella de la espiral de la placa móvil en 1mm, este sería el espesor mínimo de trabajo que se conseguiría con un postizo sin vaciar en el lado contrario, además se plantean varios insertos idénticos para el lado fijo del molde pero con huellas mecanizadas a diferentes espesores. De esta manera se pueden obtener figuras de 2, 3, 4 ó 5mm de espesor.

Como se ha explicado en el apartado interior, no modifica el espesor de toda la pieza, solo se cambia el inserto del primer tramo central que es donde se sitúan los sensores de presión y donde se realiza el análisis del comportamiento viscoso.

El análisis de este parámetro no afecta a la geometría base de la espiral, solo se varían los espesores de 1 a 5mm.



Siguiendo este procedimiento se pueden ensayar espesores mayores creando simplemente nuevos postizos con la misma huella pero con mayor profundidad de mecanizado.

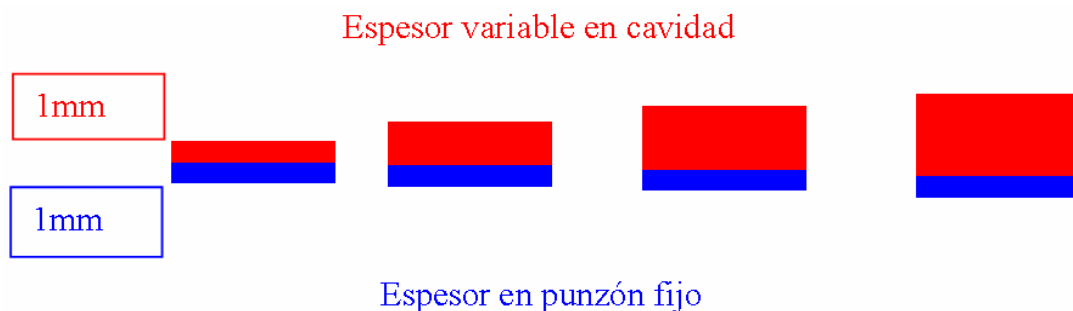


Fig. Esquema con las posibilidades de modificar los espesores

- Análisis de la influencia de superficies texturizadas:

El análisis de la influencia de superficies texturizadas también se realiza a través de distintos postizos de la zona inicial de la pieza, en los que se mecanizan las texturas que se quieren analizar.

Con este sistema se puede valorar la influencia del texturizado en el comportamiento viscoso del plástico durante el proceso de inyección, y al calcular el modelo viscoso mediante los sensores de presión, poder predecir esta influencia con un programa de simulación de inyección.



Fig. Inserto texturizado

- Análisis de la influencia y validación de diseño de geometrías “tipo rejilla”:

Con el mismo sistema de postizos se pueden analizar geometrías “tipo rejilla”. Se mecanizan insertos centrales con la geometría que se quiere analizar y con los sensores de presión se calcula el modelo viscoso del material cuando se inyecta sobre este tipo de geometría.

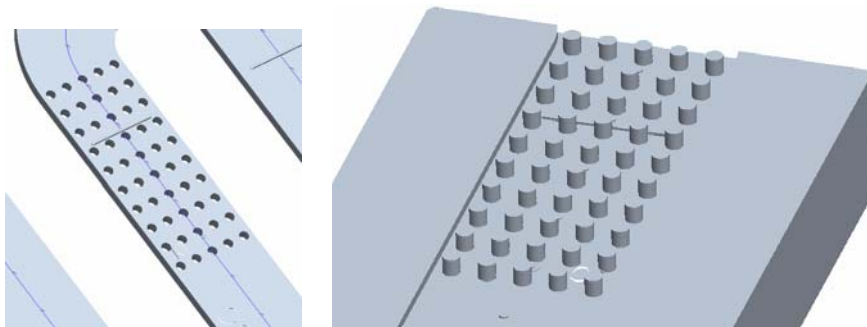


Fig. Imágenes de la geometría y de un detalle del inserto.

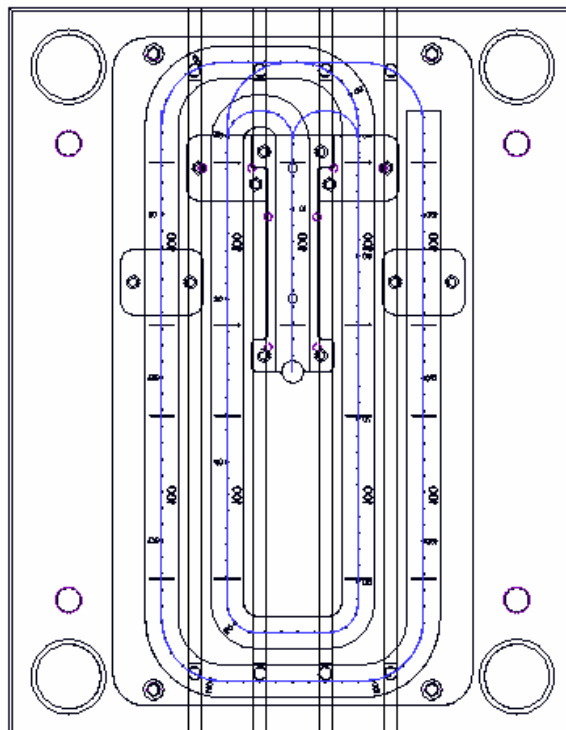
En apartados anteriores se ha explicado la problemática existente para la simulación de este tipo de geometrías. Calculando el modelo viscoso de esta geometría mediante este nuevo molde espiral se puede determinar mediante simulaciones un espesor equivalente a cada tipo de rejilla analizada y así poder simular la totalidad de la geometría de una pieza que tiene zonas con este tipo de geometría.

Sistema de refrigeración

La geometría del molde es muy sencilla por lo que el diseño del sistema de refrigeración no es crítico.

La refrigeración del molde se realiza tanto en la placa fija como en la placa móvil del molde, a través de circuitos longitudinales.

Para que no se produzcan interferencias con los postizos se localizan en las zonas donde no se mecaniza la figura.



Para mejorar la efectividad de los circuitos al máximo posible, estos se acercan en altura a la figura mecanizada discurriendo a través del inserto principal.

Finalmente se determina en 8mm el diámetro de los canales y su posición a 25mm en altura respecto de la figura de la espiral.

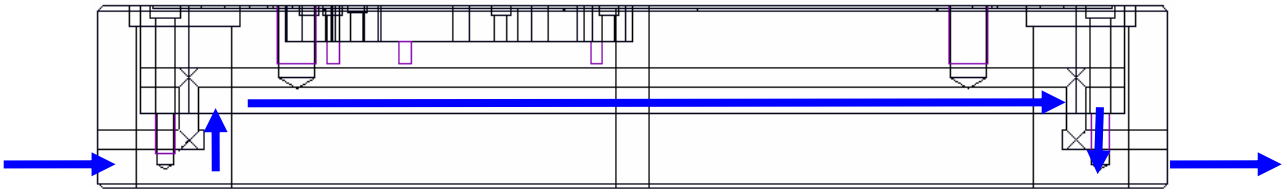


Fig. Canales de refrigeración en las placas fija y móvil

Sistema de expulsión

Es necesario un sistema de expulsión que permita extraer la pieza inyectada del molde una vez que se haya solidificado.

El sistema de expulsión se instala en el lado móvil del molde y se realiza mediante varillas de expulsores de 6mm de diámetro distribuidas por la superficie de la pieza, consiguiendo una expulsión de la pieza uniforme y equilibrada.

El mecanismo consta también de placa expulsora, placa porta expulsora y reglas separadores para accionar los expulsores.

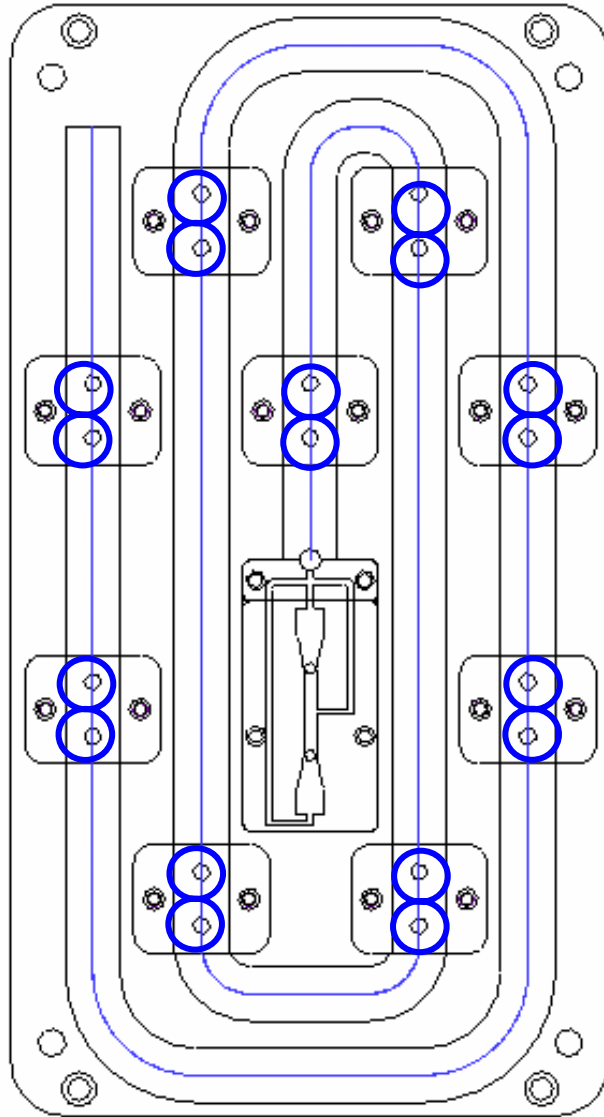


Fig. Distribución de los expulsores a lo largo de la figura.

SIMULACIÓN DE INYECCIÓN

Para validar el diseño del molde se realiza un análisis de simulación mediante un programa informático.

La geometría utilizada para la validación es la geometría más sencilla de todas las presentadas anteriormente, una espiral de 2mm de espesor.

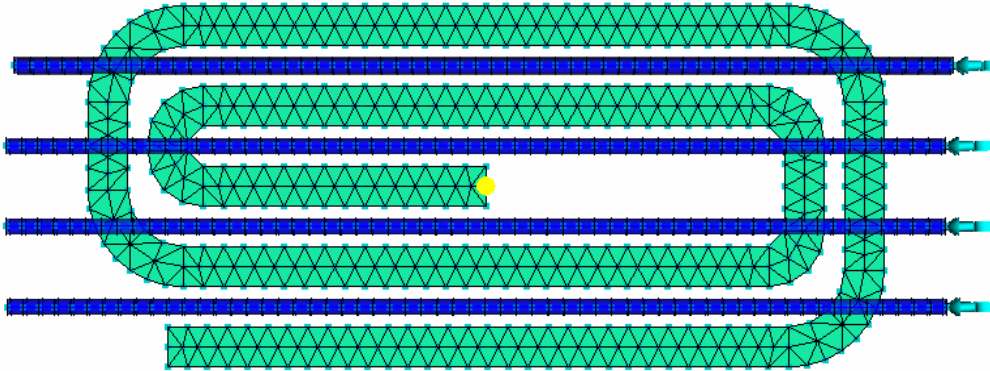


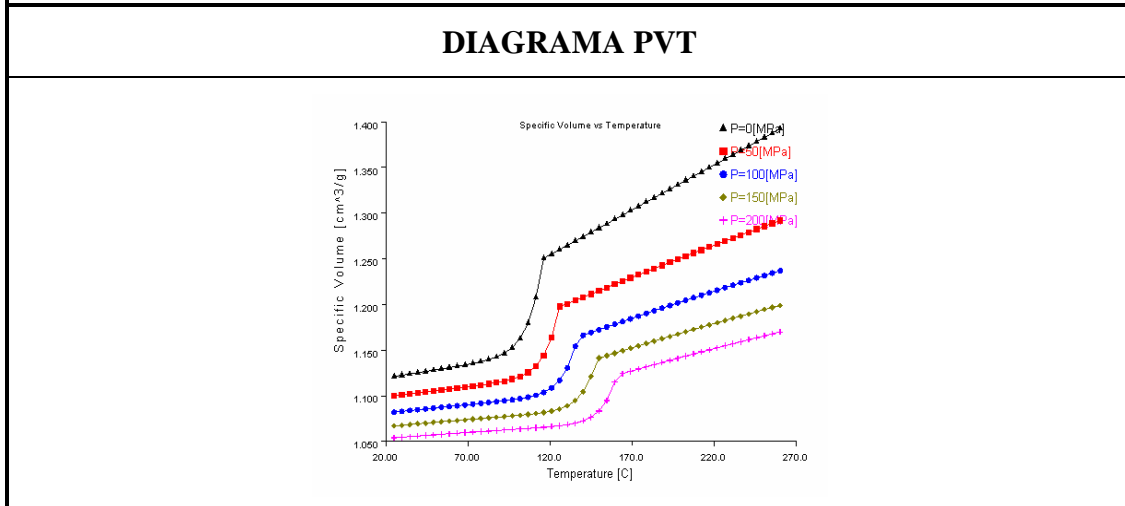
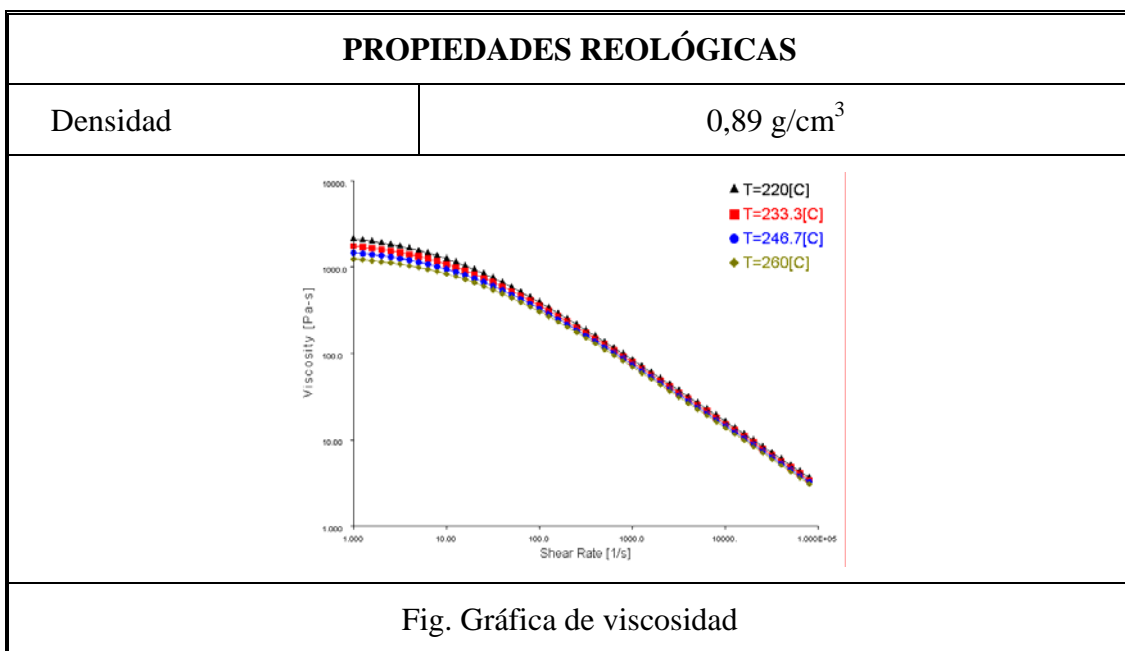
Fig. Modelización del molde, geometría de la pieza con el sistema de alimentación y refrigeración

El material elegido para realizar las simulaciones de inyección es un Polipropileno genérico, material muy utilizado en la industria de la inyección de plástico

A continuación se detallan en las siguientes tablas, las características más importantes del material obtenidas de la base de datos del programa de simulación:

CONDICIONES DE PROCESO RECOMENDADAS		
Temperatura del molde	Rango de T ^a recomendado	20 -60°C
Temperatura del material	Rango de T ^a recomendado	220 -260 °C
Temperatura de expulsión	101 °C	
Shear stress máximo.	0,25 MPa	
Shear rate máximo.	100000 1/s	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	Temperatura (T ^a)	Calor específico (C _p)
	240° C	2740 J/kg·C
Conductividad térmica	Temperatura (T ^a)	Conductividad térmica (K)
	240° C	0,645 W/m·C
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Tensión del 1% elongación	Tensión del 1% elongación	Tensión del 1% elongación

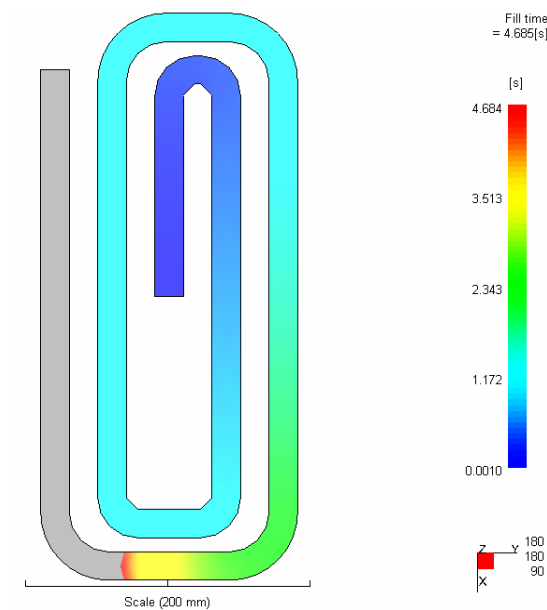


Los parámetros de proceso utilizados para la realización de las simulaciones se detallan a continuación

CONDICIONES DEL PROCESO	
T^a DE INYECCIÓN	230 ° C
TIEMPO DE INYECCIÓN	2s
PROGRAMACIÓN DE VELOCIDADES	Constante
TIEMPO DE COMPACTACIÓN	10s
PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	50 Bar
MATERIAL REFRIGERANTE	Agua
T^a DE REFRIGERACIÓN	40 °C
TIEMPO DE REFRIGERACIÓN	20s

Los resultados de simulación más importantes que se recogen de las simulaciones realizadas se presentan a continuación:

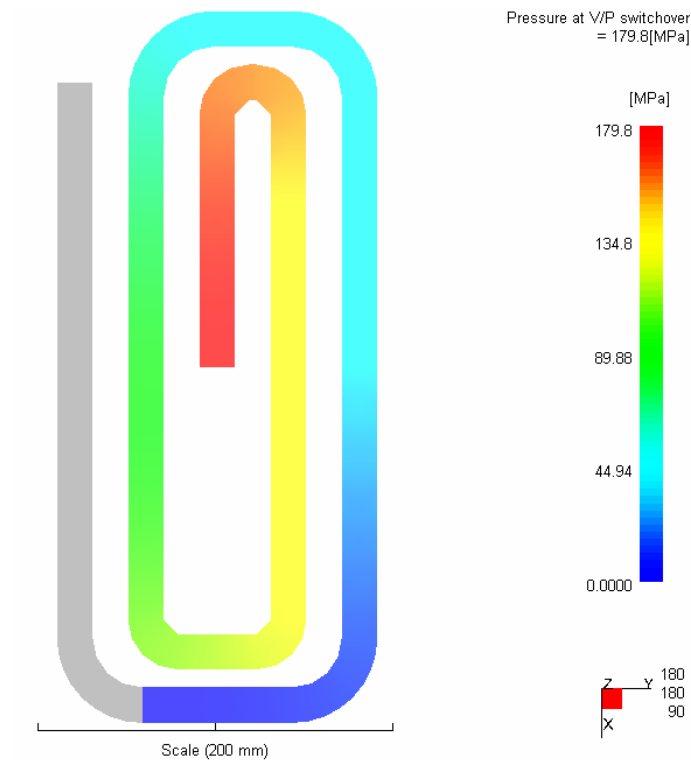
Llenado de la pieza



En la imagen se observa que la geometría representada, con el material y las condiciones de proceso impuestas en la simulación, la espiral no se llena por completo.

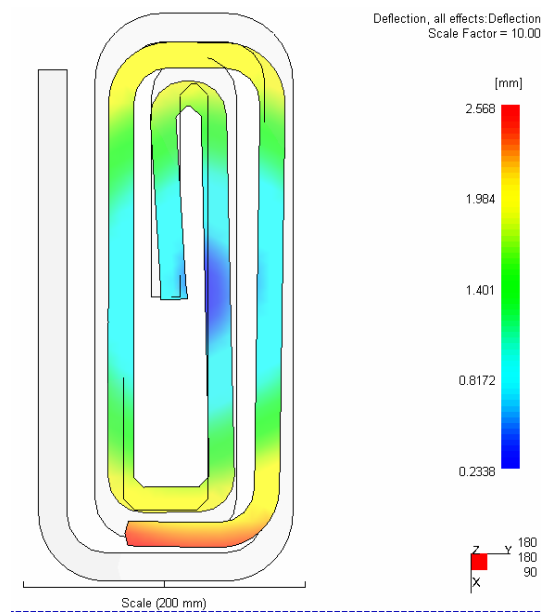
Durante la fase de llenado y parte de la fase de compactación el material se está introduciendo material en el interior del molde, en concreto, durante 4,684s el material avanza por el interior del molde y es capaz de recorrer aproximadamente 1480mm de la longitud de la espiral. El 80% del recorrido total que realiza el material lo recorre durante los 2 primeros segundos que son los que se corresponden con la fase de llenado.

Presión al final del llenado.

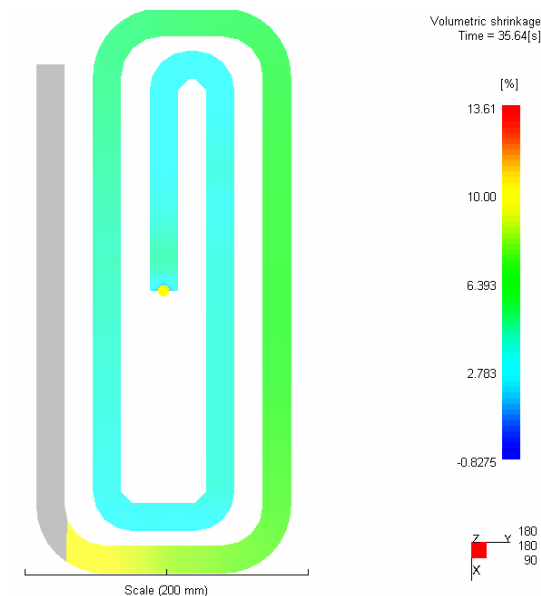


El material alcanza su máximo valor de presión de 180MPa en el momento en el que se produce el cambio de llenado a compactación.

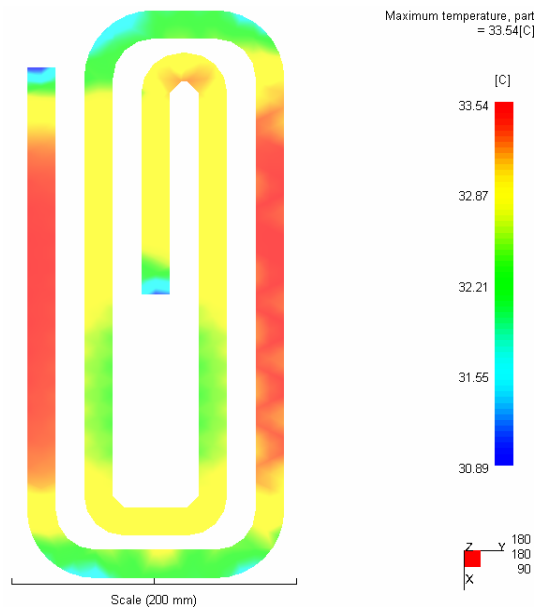
Este valor de presión tan elevado no es posible conseguirse con todas las máquinas de inyección, pero como solo se trata de una simulación para verificar el diseño del molde no se va a tener en cuenta.

Deformación.

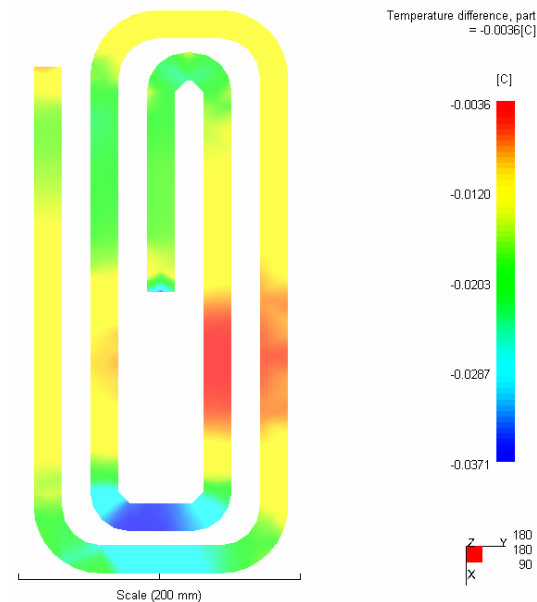
Para observar más claramente las tendencias de deformación de la pieza, a la imagen se le aplica un factor de escala de 10 aumentos.

Contracción volumétrica

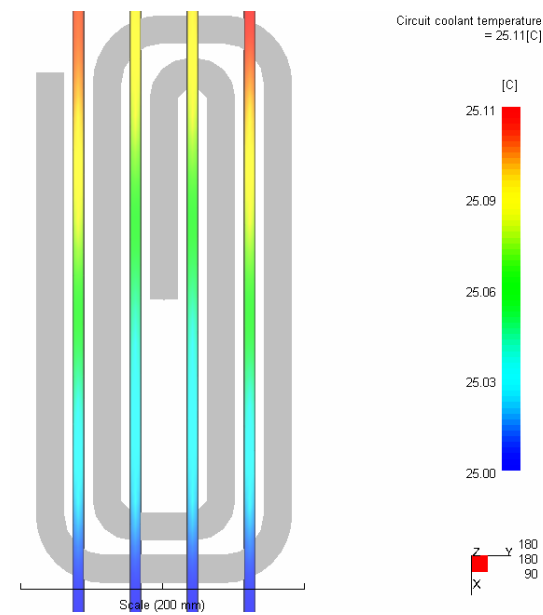
En la imagen del resultado de la contracción volumétrica se observa como la contracción del material aumenta conforme este se aleja del punto de entrada.

Temperatura máxima en las placas.

La simulación indica que la máxima temperatura alcanzada en las placas es de 33,5°, temperatura que entra dentro de lo normal para este tipo de moldes.

Diferencia de temperatura entre placas.

La diferencia de temperaturas que existe entre el lado fijo y el lado móvil del molde es despreciable, lo cual indica que el diseño del sistema de refrigeración para este molde es correcto.

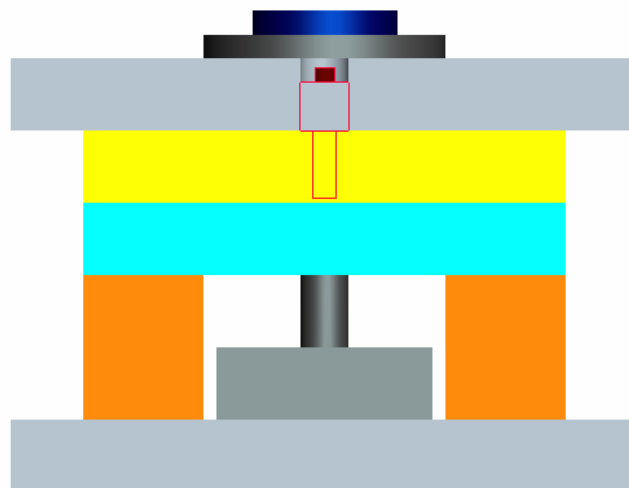
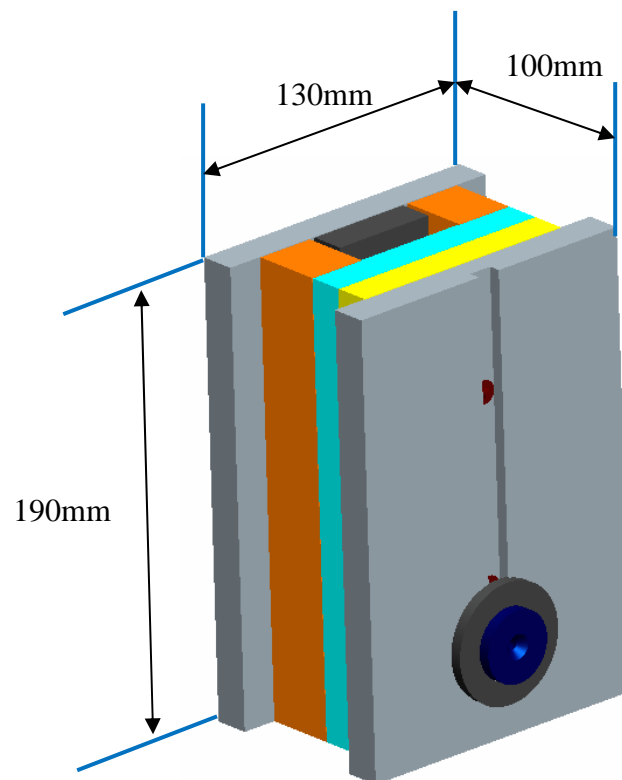
Temperatura en los canales de refrigeración.

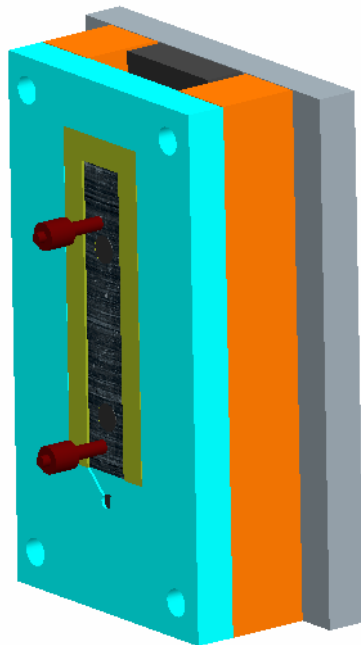
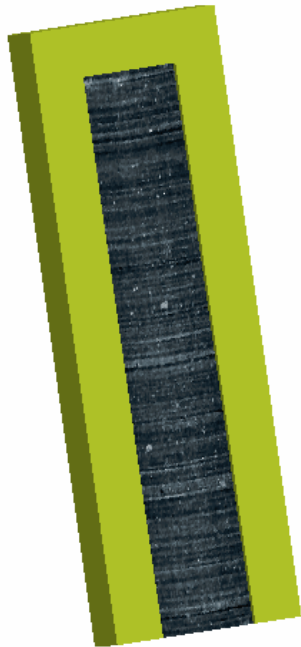
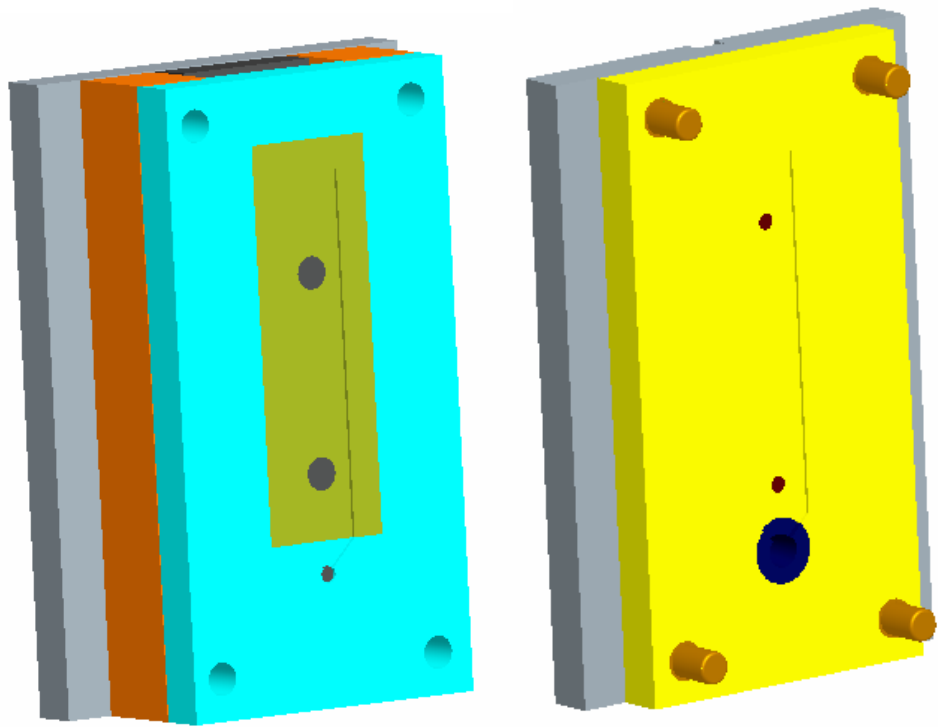
La diferencia de temperatura del líquido refrigerante entre la entrada y la salida del sistema de refrigeración no supera los 3°, por lo que la transferencia de calor en el interior del molde es correcta.

A partir de la simulación del molde que se ha realizado y con el análisis de los resultados de simulación obtenidos, se da por válido el diseño realizado del molde.

SEGUNDO DISEÑO: MOLDE SIMPLIFICADO

Analizando el método de caracterización desarrollado la parte del molde que se utiliza es únicamente la parte inicial, por tanto se plantea el desarrollo de un molde que tenga como huella únicamente esta parte. Con esto se consigue un molde de un tamaño muy reducido y con un coste mínimo. En las siguientes imágenes se muestran los detalles del molde simplificado.





Una de las principales ventajas que tiene este segundo diseño es el reducido coste del molde. Un molde de estas dimensiones con la parte móvil empostizada podría tener un coste aproximado entre 1200 y 1500 euros. Dos sensores de presión como los utilizados en el actual molde espiral aumentarían el coste del molde en 2000 euros por los que el coste total del molde con los sensores de presión superaría ligeramente los 3000 euros. Si la máquina dispusiera de un sistema de control capaz de controlar sensores de presión no sería necesaria ninguna inversión adicional. En caso contrario habría que utilizar una cadena de medida compatible con los sensores de presión semejante a la que aparece en el apartado 4.1 que tendría un coste aproximado de 3000 euros y un ordenador que almacenara y procesara la información obtenida a partir de la cadena de medida.

Presupuesto mínimo del sistema

REF.	CONCEPTO	Nº	COSTE (€)
1	MOLDE	1	1200
2	Sensores de presión	2	1800
3	Cadena de medida y sistema de adquisición de datos	1	3500
4	Ordenador personal	1	700

OPCIONES	CONCEPTO	COSTE (€)
1+2	Utilización de máquina con control de sensores de presión en cavidad.	3000
1+2+3	Molde y cadena de medida completa.	6500
1+2+3+4	Sistema completo.	7200

8.- CONCLUSIONES

A partir del trabajo desarrollado se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Se ha conseguido desarrollar un método de trabajo para la caracterización reológica de materiales termoplásticos que tiene como principales características:
 - 1) La utilización de medios industriales (máquina de inyección y molde tipo espiral) y buscando el máximo equilibrio entre la rapidez y sencillez de aplicación, la simplicidad y mínimo coste de los medios con la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. Con esto se pretende obtener un método de trabajo aplicable a nivel de pequeña y mediana empresa
 - 2) La aplicación de cara a la valoración de la influencia de parámetros de proceso que no se tienen en cuenta en procesos de caracterización convencional.
 - 3) La aplicación en situaciones denominadas a lo largo del trabajo como “no convencionales” como caracterización de materiales con problemas de homogeneidad, materiales reciclados, espumados...
 - 4) Tiene como resultado un “modelos viscoso equivalente” para utilización en programas de simulación de cara a poder tener en cuenta estas condiciones no convencionales en herramientas de simulación.

- Se ha analizado la influencia de la introducción de material reciclado en distintos porcentajes en un polietileno de alta densidad empleado en la fabricación de contenedores sobre el comportamiento reológico, aplicando métodos convencionales y el método desarrollado, y mecánico. Se ha demostrado y cuantificado el aumento de la viscosidad conforme aumenta el tanto por ciento de material reciclado introducido y la disminución de la resistencia mecánica que se produce en dicho material.

- Los modelos viscosos obtenidos mediante el método de caracterización desarrollado se han aplicado a programas de simulación y se han comparado los resultados obtenidos con dichos programas con los obtenidos en la inyección real de moldes industriales. El efecto de la introducción de material reciclado sobre la presión de inyección tiene la misma tendencia en la realidad que en los resultados obtenidos mediante la simulación. Los valores difieren en porcentajes inferiores al 10%.
- Para el material analizado los modelos viscosos obtenidos reflejan valores de viscosidad ligeramente superiores a los obtenidos mediante una caracterización con reómetro capilar convencional. Estas diferencias son mayores para shear rates bajos y menores para shear rates mas altos, usuales durante el proceso de inyección.
- Se ha propuesto la aplicación de la metodología de caracterización en otras situaciones no convencionales como inyección sobre films, moldes texturizados y geometrías complejas. Para el primer caso se ha llegado a aplicar el método para la caracterización de dos conjuntos Plástico-film y se ha aplicado a la simulación de este tipo de moldes.
- Se ha diseñado un nuevo molde de ensayo para la aplicación de forma óptima del método desarrollado planteando dos versiones, la primera como molde de ensayo complejo para diferentes aplicaciones entre las que se encuentra la caracterización reológica con molde espiral y la segunda como molde simplificado con una única función de caracterización reologica válido para la aplicación en pequeñas empresas del sector.

9.- BIBLIOGRAFÍA

Artículos consultados

1. C. A. HIEBER, H. H. CHIANG, R. C. RICKETSON, W. R. JONG Y K. K. WANG. "Melt viscosity characterization via spiral mold". ANTEC '87
2. C. A. HIEBER Y H. H. CHIANG. "Spiral –flow analysis including variable-density effects". ANTEC '93.
3. LEBLANC J.L. "Moulding of rubbers: a new rheological approach". Revue Generale des Caoutchoucs et Plastiques. 1994.
4. RAO N. S., SCHUMACHER G. Y CHUANG THE MA. "Predicting flow length of spiral melt flows in injection molds by a semi-empirical model". ANTEC '99.
5. WHALEN J.P. Y POSTON D. D. "Recycling of mineral filled thermoset epoxy". ANTEC '94.
6. XU G. Y KOELLING K. W. "Study of flor marks during thin-wall injection holding". ANTEC '91.
7. MERCADO BARRAQUETA D. "Comparación de distintas metodologías utilizadas para la determinación de las curvas reológicas de los polipropilenos usados para la fabricación de parachoques y su influencia en la viabilidad técnico-económica de los proyectos". Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza 2003.
8. AÍSA ARENAZ J. "Estudio experimental de la inyección secuencial de termoplásticos" Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 2003.
9. SERRALLER SÁNCHEZ F. "Obtención y análisis de datos del llenado de un molde espiral con ABS, para su aplicación al modelo de piezas industriales". Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 1995.
10. RAMI ARIJA E. "Diseño, desarrollo y ensayo de una boquilla monitorizada en máquina de inyección con geometría de sección rectangular". Proyecto fin de carrera, Universidad de Zaragoza, 2005.
11. FERNANDEZ A, JAVIERRE C., MERCADO D., MUNIESA M. "Large Thermoplastic Part Quality Improvements Using Monitored Nozzle". Journal of Mechanical Engineering 54 (2008)4, 258-265.

12. LÉONARDI F. "Proyecto Aquitanie-Aragón 2004-05"
13. HOFFMAN D. "The effect of recycled phenolics on processing". ANTEC '94.
14. SCRIVEN T., SYKES S. "An analysis of pre-consumer regrind in an injection molded thermoplastic part". ANTEC '95.
15. KIKUCHI A., COULTER J. P. "Vibration-assisted injection molding applied to recycled general purpose polystyrene"
16. KOSZKUL J., NABIALEK J. "Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process". *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004) 183-187.
17. HABERSTROH E., CAPELLMANN R., "Rheological characterisation of elastomers in shear and strain". *Gummi Fasern Kunststoff* 0176-1625 Oct.2002, p.647-51
18. AÍSA J., JAVIERRE C., SERNA J.A. "An example of simulation tools use for large injection moulds design: The Contenur 2400 l. solid waste container". *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006) 15-19. Factor de impacto; 0.592.
19. FERNANDEZ A., CLAVERIA I., JAVIERRE C., PLANTÁ X. "Methodology for thermoplastic bi-injection molding process simulation in order to optimize the thermomechanical welding". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2005 1734-8412 Vol 14 (1-2); pp. 344-350
20. CLAVERIA I., SERRALLER F., JAVIERRE C., CASTANY J. "Methodology in gas assisted moulding of plastics". *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003) 214-218. Factor de impacto; 0.592.

Artículos ya publicados de la tesis

21. JAVIERRE C., CLAVERIA I., PONZ L. “Method for generation of rheological model to characterize non-conventional injection moulding by means of spiral mould”. Journal of Materials Processing Technology 162-163 (2005) 477-483. Factor de Impacto: 0.592
22. JAVIERRE C., CLAVERIA I., PONZ L. FERNANDEZ A. “Influence of the recycled material percentage on the rheological behaviour of HDPE for injection moulding process”. Waste Management Enero 2007. 27 (2007) 656-663. Factor de Impacto: 1.1

Libros consultados

23. AMES W.F., “Numerical Methods for Partial Differential Equations 2nd Ed”, Academic Press, New York, 1977.
24. BARMES H.A., HUTTON J.F., WALTERS K., “An introduction to rheology”, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989.
25. BERINS M.L. (Ed.), “Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry 5th Ed”., Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
26. CARPIO M. A., RAMOS RUIZ M. R. de Maria, “Ingeniería de los materiales plásticos”, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 1988.
27. NIELSEN LAWRENCE E., “Polymer Rheology”, Marcel Dekker, 1977.
28. PETER K., “Flow Análisis of injection molds Hanser Publishers”, Munich Vienna New York, 1995.
29. RAO NATTI S., “Design formulas for plastics engineers”, Hanser Publishes, Munich, 1991.