

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

TESINA DEL MASTER DE DISEÑO Y
FABRICACIÓN INTEGRADAS ASISTIDOS POR
COMPUTADOR



Estudio de las variables de inyección de termoplásticos a partir de la forma de la pieza mediante herramientas CAD, CAE.

Autor

Juan Luis Gámez Martínez

Dirigida por:

Dr. Miguel Jorge Reig Pérez

Dr. Santiago Ferrándiz Bou

Agradecimientos

A mis directores de la tesina Dr. Santiago Ferrándiz Bou y Dr. Miguel Jorge Reig Pérez por la paciencia y dedicación y sobre todo por haberme enseñado.

Estudio de las variables de inyección de termoplásticos a partir de la forma de la pieza mediante herramientas CAD, CAE.

Resumen

La gran parte de productos de consumo contienen partes realizadas a través del proceso de inyección de termoplásticos, esto constata la importancia de este proceso de conformado con respecto a otros procesos de transformación de plástico. La minimización de los costes para ser más competitivos así como la eliminación o reducción de defectos en las piezas inyectadas, han sido los motivos principales para controlar el proceso a través de la optimización de las variables que entran en juego en este proceso, es por ello que se han realizado numerosos estudios referentes a obtener las relaciones existentes entre las variables del proceso y los aspectos de rentabilidad, estética y defectología de las piezas inyectadas. Modelizar dichas relaciones a través de algoritmos matemáticos con el fin de optimizar los resultados obtenidos y predecir el estado final de las piezas inyectadas han sido los objetivos de la mayoría de estudios.

Este estudio va en la misma línea de intentar descubrir y optimizar las condiciones de entrada del proceso de inyección a través de la observación y modelización de las variables de salida.

Más concretamente definir las dimensiones más favorables desde el punto de vista económico y de procesabilidad de una pieza plana que ocupa un volumen determinado.

Por lo tanto como variables de entrada tenemos las dimensiones de dicha pieza y como variables de salida las variables de inyección en sus fases de llenado y de compactación.

Y la pregunta que nos realizamos es ¿Cómo varían dichas condiciones de inyección modificando las dimensiones de la pieza? ¿Cuáles son las dimensiones de la pieza a estudio que minimizan los efectos negativos en las variables de salida? O por el contrario ¿Cuáles son las dimensiones de la pieza a estudio que maximizan los efectos positivos de las variables de salida?

A todas estas preguntas intentamos dar respuesta en el estudio siguiente.

Índice de contenidos

1. Introducción.	11
1.1. Información bibliográfica.	22
1.2. Estadística de los artículos referentes al tema de estudio.	23
2. Objeto del estudio	31
2.1. Objeto	31
2.2. Metodología	32
2.3. Alcance del estudio	33
3. Variables a estudio	37
3.1. Descripción de las variables independientes.	37
3.2. Descripción de las variables dependientes en fase de llenado.	38
3.3. Descripción de las variables dependientes en fase de compactación.	40
3.4. Parámetros de procesado a optimizar.	41
4. Estudio de diseño	45
4.1. Características del material	45
4.2. Estudio de diseño de las piezas	46
4.3. Bebedero y canal de distribución	47
5. Optimizado de los parámetros de proceso	57
5.1. Optimizado del tiempo de Llenado	57
5.2. Optimizado de la temperatura de masa.	62
5.3. Optimizado de la presión de compactación.	66
6. Resultados	77
6.1. Valores obtenidos tras el estudio de llenado	77
6.1.1. Presión de inyección:	79
6.1.2. Fuerza de cierre.	81
6.1.3. Temperatura 95 %	84
6.1.4. Tensión de cizalla.	87
6.1.5. Velocidad de cizalla	91
6.1.6. Desviación de la temperatura en masa tras el llenado.	95
6.1.7. Tiempo necesario para la expulsión	99

6.2. Valores obtenidos tras el estudio de compactación. _____	104
6.2.1. Diferencia entre máxima presión y pico máximo de presión _____	106
6.2.2. Fuerza de cierre en la compactación _____	111
6.2.3. Deformación _____	115
6.2.4. Contracción Volumétrica _____	118
7. Recopilación de los datos y observaciones _____	123
8. Relación con el número Phi. _____	131
9. Conclusiones finales _____	135
10. Programas empleados _____	139
11. Bibliografía _____	143
12. Anexo _____	149
12.1. Características de material _____	149
12.2. Imágenes de la pieza 03 y de la serie B (1,5 mm) _____	152

INTRODUCCIÓN

1. Introducción.

Muchos de los productos que conocemos en la actualidad, que vemos por los escaparates de infinidad de tiendas, que nos rodean allá donde vayamos no estarían presentes o no hubieran sido adquiridos por muchos de nosotros si se hubieran diseñado y fabricado bajo otro proceso de fabricación que no fuera la inyección de termoplásticos.

Gracias a este proceso de transformación del plásticos se han diseñado nuevos productos y han acercado muchos de los productos de consumo a nuestras casas haciendo que la vida sea más fácil y cómoda.

La inyección de termoplásticos ha supuesto un desarrollo amplio de los productos de consumo posibilitando formas complejas y caprichosas con la resistencia oportuna para un ciclo de vida impuesto de los productos que consumimos y además nos ofrece la posibilidad ejecutar la fabricación de tiradas largas de un mismo producto a precios asequibles a nuestros bolsillos, en base a esto, tres conceptos sobresalen inicialmente que pueden definir completamente al proceso de inyección de termoplásticos, las estética, la robustez y los costes de producción.

En base a estos tres aspectos se han intentado relacionar las variables de entrada del proceso de inyección de termoplásticos. Numerosos estudios realizados relacionan las variables iniciales de entrada del proceso de inyección con estos aspectos aplicables a las piezas de plástico obtenidas bajo este proceso.

Si bien es cierto que muchos de estos de estudios no son aplicables a todas las piezas plásticas que se producen bajo el modelado por inyección, dada la variedad de piezas existentes y que cada una de ellas conlleva unas condiciones de procesabilidad distintas sí que algunos de los estudios relaciona de forma generalizada el comportamiento del proceso en base a aspectos geométricos de las piezas.

De todos los artículos referentes a los estudios aplicados a la optimización del proceso que se han examinado, solo alguno de ellos hace referencia explícita al tema que aquí se trata de intentar adecuar la forma y dimensiones de las piezas inyectadas a las variables independientes de la inyección de termoplásticos para obtener unos modelos más robustos de fabricación, la explicación a esto radica en que son las condiciones de geometría y forma exigidas por la estética y funcionalidad principalmente las que condicionan el proceso de

inyección y no el proceso inverso lo cual es coherente dada la gran necesidad de formas que se requieran para abarcar todas las necesidades de los productos.

Pero esta circunstancia no quita que desde un punto de vista conceptual del diseño del producto, intentemos introducir algunas premisas iniciales que sin restar funcionalidad, compromiso estético, robustez y condiciones económicas sí que produzcan unas mejoras en estos tres aspectos a través de las mejoras en las condiciones de procesamiento.

Muchos son los estudios referidos a la minimización en general de defectos asociados a este proceso de inyección a través de las variables del sistema que ofrece el propio proceso, y de una forma más repetida a defectos de deformación, alabeos y contracciones en esta línea hay muchos de ellos que introducen como variable del sistema algunos aspectos geométricos como el espesor de la pieza o la colocación de la entrada de material para minimizar estos defectos. Lo que diferencia unos estudios de otros es la forma de la pieza y la metodología empleada donde el método de Taguchi y redes neuronales son los métodos a resaltar por la cantidad de veces que se han empleado.

Pero en general la gran mayoría de los estudios realizados sobre la optimización de los parámetros de máquina con el fin de reducir los defectos de las piezas actúan sobre los alabeos, posicionamiento o reducción de las líneas de soldadura, posicionamiento de las entradas de material, dimensionado de los canales de distribución de material, o bien con el objeto de reducir los defectos en las piezas o bien con el objeto de minimizar las condiciones del proceso.

En cuanto al balanceado del llenado también es un tema recurrente en estos artículos basándose sobre todo en la localización adecuada del punto de entrada así como en el dimensionado de los canales de alimentación.

También se ha escrito bastante sobre la localización adecuada de los canales de refrigeración así como su dimensión con la finalidad de obtener una temperatura homogénea en la pieza para eliminar tensiones y deformaciones o con el fin de reducir los tiempos de inyección.

Como curiosidad y datos de interés comentar que una de las piezas más examinadas corresponde a carcasas o bien como una sola cavidad o bien en multicavidad.

Muchos de los estudios de optimización, se realizan en piezas comerciales como cajas, carcasas de plástico, carcasas para teléfonos móviles, bafles, etc.

También existe una tendencia de estudio interesante en la cual se pone de manifiesto la relación que existe entre la forma de la pieza con los costes de producción incluso junto con las características del molde y a través de algoritmos ofrecen recomendaciones de empleo de materiales y dimensiones referidas a componentes del molde, el factor común de estos estudios radica en la aceptación de la ingeniería concurrente como punto de partida.

Dentro de esta reflexión, si bien los artículos examinados no se ajustan con exactitud a la idea del presente estudio sí que han servido de inspiración en algunos aspectos.

Hamdy Hassan, Nicolas Regnier, Guy defaye^[1] analizan la *mejor posición de la entrada de material* a la pieza desde el punto de vista de la solidificación de la pieza a través de un modelo numérico por volumen finito, esta pieza tienen dos espesores distintos y analiza tres posibles soluciones dando como la más acertada aquella entrada que ataca a la pieza perpendicularmente en su parte más estrecha siendo esta disposición la que minimiza el tiempo necesario para la solidificación completa de la pieza y al mismo tiempo minimiza la solidificación del producto en su fase de llenado, la finalidad final es reducir el tiempo de llenado con la consiguiente reducción de costes.

Referente a la posición de la entrada de material y la distribución de piezas en un molde multi-cavidad y con el objeto de equilibrar el llenado de las cavidades los autores Gujian, H.A, Xuemei, L.b. Xiaoyu, W.a y Jibin, L.a.^[2] logran optimizar la posición de las cavidades así como el dimensionado de los canales de alimentación en base a la minimización de las deformaciones, la tensión de cizalla, la temperatura de flujo, presión de inyección, etc, para este proceso de optimización emplean el software Moldflow Plastics Insigth.

También es de vital importancia la posición correcta de las entradas de material con el fin de controlar la dimensión y posicionamiento deseado de las líneas de soldadura para eliminar zonas críticas de rotura este requisito lo ponen de manifiesto Zhai. M, Lam, L.C ; y Au, C.K^[3] donde en el estudio logran situar la entrada de material y el dimensionamiento de los canales de alimentación para que la línea de soldadura se sitúe en las zonas menos críticas dentro de una pieza inyectada a través de dos puntos opuestos inicialmente.

El método empleado por estos autores es dividir el moldeado en submoldeados, partiendo de las líneas de soldadura iniciales y de los puntos de inyección iniciales, después se determina la correcta entrada en cada uno de los submoldeados en base a la minimización de la presión de inyección, después vuelven a unir los submoldeados y obtienen nuevas líneas de

soldadura dado que los puntos de entrada de material han variado, y por último vuelven a posicionar las líneas de soldadura variando el tamaño de los canales de distribución.

Dentro del optimizado de variables dimensionales de los elementos del molde de inyección nos encontramos con lo estudiado por K.S. Lee y J.C.Lin ^[4] que diseñan los canales de alimentación y la entrada de material con el fin de minimizar la deformación, para ello emplean el método de Taguchi y la red neuronal como métodos de optimización.

Como objeto de estudio el diseño y posicionamiento de las entradas de material Shen, Yk, Wu, Cw, Yu, Yf y Chung, Hw ^[5] obtienen con la ayuda de análisis de elementos finitos la posición correcta del sistema de entradas para una tapa de las pilas de un diccionario electrónico bajo los condicionantes de disminuir la presión de inyección y las líneas de soldadura.

Zhai, M, Lam, Y.C, Au, C.K. y Liu D.S. ^[6] tratan de optimizar la posición de la entrada de material a la pieza basándose en minimizar la presión de inyección al final del llenado bajo la condición de una velocidad de flujo constante para ello emplean un método basado en el gradiente máximo de presión. De esta forma consiguen minimizar la presión de inyección y un llenado uniforme del molde, reduciendo así las sobrecompactaciones en la pieza.

Chun-Yin Wu, Chih-Chiang Ku, Hsin-Yi Pai ^[7] extraen las dimensiones adecuadas con los parámetros oportunos de inyección como la temperatura en el molde, la temperatura de la masa fundida, el tiempo de inyección, la presión de compactación, el tiempo de compactación y el tiempo de enfriamiento con el fin de minimizar el alabeo y las líneas de soldadura que existen en la inyección de un marco de fotos. Las variables geométricas corresponden tanto a la pieza como a las características dimensionales del canal de distribución el cual está situado en el centro del marco, la técnica de optimización la obtienen a través del método DMPGA (distributed multi-population generic algorithm.). Este es uno de los pocos artículos que he examinado en el cual el diseño de la pieza se optimiza en función de obtener una mejor calidad en la pieza y unos parámetros de máquina más eficientes en la inyección.

J.K.L.Ho, K.F.Chu, C.K.Mok ^[8] Realizan una comparativa de costes de producción asociados a la inyección de una pieza de pequeño tamaño inyectada con termoplásticos, en la comparativa se enfrenta los criterios habituales para disminuir los costes de producción como son la reducción del peso de la pieza a través de la reducción del espesor contra el ahorro producido con el empleo de una inyección eficiente energéticamente, dado que inyectar con espesores más altos requiere una presión de inyección inferior y esto se traduce en un ahorro

energético y compara dicho ahorro obtenido con el ahorro obtenido con la reducción en un 50% del espesor. Por otro lado también compara las deformaciones obtenidas en ambos casos, concluye con la confirmación de que es más barato inyectar con espesores elevados dentro de un rango que con espesores bajos, además a los espesores bajos les acompañan unos valores de deformación muy superiores reduciendo la calidad del producto obtenido.

Y.M. Deng, D.Zheng, X.J. Lu ^[9] en la misma línea pero con un método distinto, el PSO (Particle swarm optimisation) un algoritmo para el optimizado de multivariantes, optimizan el espesor de la pieza, la temperatura de masa fundida, la temperatura del molde, el tiempo de inyección y la localización de la entrada de material en base a minimizar el alabeo, las líneas de soldadura y atrapamientos de aire. En este caso la pieza sometida a análisis no es una pieza comercial por lo que las conclusiones aquí desarrolladas quizás no se puedan aplicar a las piezas comerciales con diseños de forma más complejos, pero es un ejemplo más de cómo adaptar las formas del producto hacia una inyección más favorable que ofrezca unas características de resistencia y calidad más positivas.

En cuanto al optimizado del espesor Pichai Jariyatammanukul, Nipat Paecheroenchai, Patcharaphol Pomkajohn y Somjate Patcharaphun ^[10] analizan cual es el efecto del espesor de la pieza sobre la fuerza de las líneas de soldadura en piezas inyectadas reforzadas con fibra, el material empleado es PP con un 30% de fibra de vidrio.

Ozcelik. B y Sonat. I ^[11] empleando el método Taguchi analiza el efecto del alabeo de una carcasa para teléfono móvil modificando el espesor de la carcasa, para el análisis del alabeo emplean el MoldFlow Plastics insight, concluyendo que el parámetro que más influye sobre el alabeo es la presión de compactación. Posteriormente buscan el punto más crítico a efectos de resistencia de la carcasa, el material empleado es el PC/ABS.

Para comprobar la resistencia realizan ensayos de tracción y de resistencia al impacto sobre las probetas extraídas de un molde creado para tal efecto. Según el sistema de canales se obtienen dos tipos de probetas el primer tipo tiene las entradas cada una por un extremo opuesto lo que favorece la creación de las líneas de soldadura y el otro tipo, solo entra el material por un extremo de la pieza lo que elimina el fenómeno de creación de líneas de soldadura.

El resultado final es que las líneas de soldadura son más resistentes cuando el espesor es más pequeño debido a que un espesor más bajo orienta mejor las fibras, mientras que espesores grandes las fibras no quedan todas igualmente orientadas.

En cuanto a las piezas sin líneas de soldadura estas tienen una resistencia al impacto y a la tracción que duplica a las probetas que tienen la línea de soldadura.

Yimin Deng y Di Zheng ^[12] manteniéndose en la misma dirección de la optimización desarrollan una aplicación informática programada con Microsoft visual C++ con la cual integran el CAD y el CAE con la finalidad de optimizar el espesor de la pieza en base a la minimización de respuestas en la inyección como son tensión de cizalla, presión de inyección, etc.

Un ejemplo más en pro de la adaptación de las formas conducidas hacia una inyección eficiente nos lo ofrecen S.S.S. Imihezri. S.M. Sapman ^[13] donde hacen una comparativa en cuanto a los parámetros de inyección referentes a dos secciones distintas, una en forma de "I" y otra en forma de "T", y analizan y comparan los nervios en "V" y en "X" no solamente a efectos de resistencia sino también a efectos de procesabilidad donde contrastan los valores del tiempo de llenado, los atrapamientos de aire, las líneas de soldadura y la distribución de temperatura y presión en estos dos diseños, al final del estudio adoptan el perfil en "I" con las nervaturas en "V" para la palanca de un pedal para el coche.

También relacionado con los nervios Jiang Bing-yan, Chu Chun-Peng, Tang Mei-lin y Shen Long-jiang ^[14] estudian las características de las dimensiones del nervio como son su posición con respecto a la entrada de material, forma, y sección del nervio con la longitud del flujo.

Los artículos que bajo estas líneas se detallan corresponden a la relación de la forma de la pieza con la complejidad del molde contrastando en algunos casos la complejidad del molde con el coste del molde, pudiéndose obtener de forma aproximada el coste del molde.

C.K. Mok, F.S.Y. Wong ^[15] para la creación de un sistema de reconocimiento automático de las formas de las piezas inyectadas clasifica las formas y rasgos más comunes en las piezas realizadas bajo el proceso de inyección otorgando las funciones que realizan estas formas, en este aspecto no definen las formas exteriores de las piezas que son las que aportan las características estéticas del propio producto y lo definen como un artículo diferente, solo tratan aquellas formas comunes a todos los productos inyectados, es decir torretas para tornillos, nervaturas, etc.

Rawing Raviwongw, Venkat Allada ^[16] proponen una nueva herramienta de análisis basada en una red neuronal artificial con el fin de obtener el índice de complejidad del molde de inyección, para ello analizan la geometría de la pieza, la línea de partición, el coste de

material del molde y el número de cavidades esta metodología pueda extrapolarse a la extracción de un índice de procesabilidad en función de las formas geométricas de las piezas.

M. Márquez, A. White, R. Gill ^[17] Basado en la filosofía DFM (Design for manufacturing) y a través de una red neuronal híbrida se realiza un análisis de procesabilidad de un producto modelado con plásticos reforzados, inicialmente se hace un reconocimiento de la forma estudiando los vectores asociados a las superficies de la pieza, por otro lado se han definido los criterios de diseño óptimos que garantizan una procesabilidad adecuada, la red neuronal procesa los datos obtenidos y los contrasta con los criterios de procesabilidad tras este paso se muestran las recomendaciones orientadas a la modificación de la forma de la pieza con el fin de adecuarse a los criterios de procesabilidad óptima.

Basado también en la filosofía de la ingeniería concurrente a través de DFM (design for manufacturing) y DFA (desing for assembly) y relacionado con la obtención de costes de productos de plástico inyectados los autores Yuh-Min Chen y Jang-jong liu ^[18] han desarrollado una aplicación informática que permite la obtención de los costes de producción de piezas de plástico inyectadas relacionando los factores de coste que más impactan en la producción de estas piezas con la geometría de la pieza, el coste integro de la pieza asume los costes parciales de la propia pieza, así como los costes asociados a la ejecución y mantenimiento del molde, y la propia producción de la pieza. La ventaja que ofrece esta metodología radica en que podremos obtener el coste final de la pieza paralelamente a la etapa de diseño de la pieza. Basándose principalmente en la morfología de la propia pieza recurriendo a factores de forma de la pieza como son el tamaño, la precisión y tolerancias de la pieza, la línea de partición, etc. Si bien de la lectura de este texto no se desprende la relación de las formas de las piezas con las variables de inyección si resulta interesante ver cuáles van a ser los aspectos geométricos de dichas piezas que más van a repercutir en el coste final de las piezas y puede servir de complemento o de inspiración a la hora de desarrollar productos más competitivos desde el punto de vista de la procesabilidad.

K.C. Hui ^[19], analiza la geometría de la pieza con la capacidad de desmoldeo detectando las contrasalidas y diferenciándolas entre contrasalidas externas o contrasalidas internas, esto lo hace a través de algoritmos aplicados a herramientas CAD/CAE, al final con la combinación de dichos agentes morfológicos se obtiene la línea de partición.

No se ha hablado hasta el momento de la relación de la forma de la pieza con el material termoplástico con el que se inyectará la pieza en este aspecto se destaca el artículo realizado por Kwai-Sang Chin y T.N. Wong ^[20] donde a través de *inputs* referidos a las características

finales de la pieza: formas geométricas, como el espesor, las dimensiones, contrasalidas, líneas de partición, y geometría de la pieza, así como aspectos requeridos a la pieza: aspectos mecánicos, térmicos, de apariencia, de procesabilidad, de costes, se relaciona a través de bases de datos compuestas por las propiedades de los materiales plásticos y características constructivas de los moldes y ofrece como *outputs* materiales más adecuados para la inyección y que cumplen los requerimientos de diseño de la pieza y valores dimensionales de los componentes de los moldes.

En la línea de la predicción de parámetros de inyección se encuentra lo estudiado por Yarlagadda ^[21] donde a través de una red neuronal híbrida que funciona a través de los algoritmos llamados *Error Back-propagation* y *Levenberg-Marquardt approximation*, predice el tiempo de inyección y la presión de inyección, a partir de aspectos geométricos como el espesor de la pieza y dimensiones y formas de los canales de distribución y condiciones de procesado como temperatura de molde, temperatura de la masa.

Chih-Cherng Chen, Pao_lin su, Yan_cherng Lin ^[22] Obtienen y optimizan a través de la metodología de las superficie respuesta la relación existente entre la velocidad de inyección, la presión de compactación, la temperatura del molde y la temperatura del fundido con el fin de reducir la contracción de la una pieza plana, inicialmente optimiza y fija el tiempo de llenado en función de la presión de inyección (o velocidad de inyección) con el fin de obtener un procesado más rentable.

Ko-ta Chiang, Fu-Ping Chang ^[23] optimizan las variables de inyección de la temperatura de molde, la temperatura de masa la presión de llenado así como el tiempo de llenado con la finalidad de obtener máxima resistencia de las líneas de soldadura, minimizar la contracción y la diferencia en la distribución de la temperatura en la pieza. La técnica de optimizado es una aplicación llamada Grey-fuzzy. Esta optimización se produce sobre una tapa para un teléfono móvil.

Velocidad de inyección, presión de compactación, temperatura de molde y temperatura de flujo son los parámetros de inyección seleccionados por Chen. C, Su. P y Lin. Y ^[24] para el optimizado de este estudio. Es a través de la metodología de superficie respuesta donde se relacionan las variables anteriores con las variables respuesta, con la finalidad de reducir la contracción, los estudios demuestran que es la temperatura de masa uno de los factores que más inciden sobre la contracción, seguido de la presión de compactación, la temperatura del molde y de la velocidad de inyección, esto en cuanto a la contracción transversal, mientras que en la contracción longitudinal, es la presión de compactación la variable que más incide en la

contracción, seguido de la velocidad de inyección, la temperatura del fluido y la temperatura del molde.

Fieles a la línea de estudio del optimizado de los parámetros de inyección para la minimización de los defectos encontramos varios ejemplos de estudios que se repiten un gran número de veces a lo largo de todos los archivos revisados, en primer lugar tenemos a los autores Hasan Oktem, Tuncay Erzurumlu y Ibrahim Uzman ^[25] que aplican el método de Taguchi para optimizar la deformación asociada a la contracción en las piezas inyectadas en plástico, (Taguchi es un método para el diseño de experimentos que reduce el número de combinaciones entre los parámetros a estudio), una vez obtenidas las variables de respuesta a través de análisis de elementos finitos (Moldflow) estas se analizan a través del análisis de varianza (ANOVA) con la finalidad de obtener la mejor combinación que reduce la deformación e incluso la predicción de los valores de la deformación bajo una combinación de los parámetros definida previamente. En este caso los parámetros empleados son la velocidad del flujo del material, la velocidad de inyección, la temperatura del molde y la temperatura del flujo correspondientes a unos tiempos de llenado.

S.H. Tang, Y.J. Tan, S.M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail, R. Samin ^[26] trabajan en la misma línea, pero solo analizan la deflexión en el eje Z, también es a través del método Taguchi y de ANOVA como logran optimizar los parámetros de inyección con el fin de minimizar la deformación, la pieza que aquí analizan es una pieza plana rectangular con un espesor de 1 mm.

Ming-Chih Huang y Ching-Chih Tai ^[27] con el método Taguchi y con la ayuda de una aplicación de análisis de elementos finitos describe cuales son los factores que más afectan a la deformación, concluyendo que es la presión de compactación la que más influye sobre este defecto, seguido de la temperatura del molde, la temperatura del flujo y el tiempo de compactación.

En otro estudio similar realizado por Zeng. y He.Z.b. ^[28] combinan los parámetros de inyección como son la temperatura de flujo, presión de compactación, la contracción volumétrica, tiempo de inyección con el método de Taguchi con el fin de minimizar el alabeo.

Un estudio realizado por Ozcelik, B y Erzurumlu, T.^[29] a través de la integración del análisis de elementos finitos, DOE, metodología de superficie respuesta y un algoritmo genérico son investigados y empleados con la finalidad de minimizar el alabeo y deformaciones, modificando la altura, el ancho y el largo de una carcasa con espesor delgado,

obteniéndose así un modelo predictivo del alabeo. Las variables de inyección como temperatura de molde, temperatura de masa, tiempo de inyección, presión de inyección, etc, permanecen constantes en valores que minimizan el alabeo.

Padilla, A. Baselga, J. y Bravo .J ^[30] comparan los valores de deformación de una pieza inyectada con poliamida 6/10 con 30% de fibra de vidrio obtenidos a través del software C-MOLD con los valores reales de deformación obtenidos con la medición de las piezas, en este caso la elección de los puntos cuya deformación se quiere medir es de vital importancia para el resultado del estudio, es decir que los puntos cuya deformación se han obtenido a través del C-MOLD debe coincidir con la situación física de dicho punto en la pieza real.

Existe un acercamiento extraordinario entre ambos procedimientos, exceptuando los puntos situados sobre el borde de la pieza donde existe un valor de deformación distinto entre ambos métodos de consulta.

El efecto de la deformación de la pieza sigue siendo una línea de estudio bastante empleada, pero bajo distintos métodos de optimización, en este caso los autores Cheng. Gd, Liu. St y Guo. X ^[31] emplean un método de optimización distinto, en su artículo se emplea el método Kriging, este método es similar al método de correlación lineal pero más preciso ya que sitúa el valor del punto en la curva con relación a la media de las desviaciones del punto primitivo con respecto a los más cercanos.

A través de este método se reduce el tiempo de optimización con respecto al empleado con el análisis de elementos finitos. Los parámetros optimizados en este caso no difieren de de los parámetros analizados en otros artículos similares, en este caso son la temperatura del molde, la temperatura de masa, el tiempo de inyección y la presión de compactación, y se optimiza sobre una carcasa de un teléfono móvil. Tras los resultados se puede ver la importancia del tiempo de inyección dentro de unos valores en la reducción del alabeo.

Otros estudios que resultan interesantes a nivel del comportamiento del flujo en la fase de llenado es el que propone C.K. Au ^[32] que desarrolla una técnica geométrica a través de la cual puede desarrollar la forma que va ocupando el flujo en la fase de llenado dependiendo de el punto de entrada del material, de la forma de la pieza y de los elementos geométricos de la pieza que frenan ese frente del flujo, esto lo hace estudiando cuatro modelos de comportamiento distinto del avance de los flujos.

Otra línea de trabajo es la referida al diseño de los canales de refrigeración con la finalidad de obtener una forma y posición que disminuya el tiempo de inyección o bien que

homogenicen el enfriamiento dentro de la pieza, bajo esta base de estudio están Hong-Seok Park y Xuan-Phuong Dang ^[33] donde optimizan la forma y la posición de los canales de refrigeración para un molde de un embellecedor de un altavoz, para ello emplean un algoritmo obtenido a través de la relación existente entre la configuración de los canales de refrigeración, parámetros del proceso, material del molde, espesor de la pieza y la distribución de la temperatura con la ayuda del DOE y el método de superficies respuesta, obteniendo así ecuaciones que predicen y determinan la distribución de temperatura a lo largo de la pieza bajo la acción de la refrigeración, la temperatura de la superficie del molde así como el tiempo de enfriamiento, los datos obtenidos en dos casos de estudio los comparan con los mismos datos pero obtenidos con el MoldFlow Plastics Insight.

Con la finalidad de obtener un mejor acabado superficial en las piezas inyectadas los autores Kurt. M, Saban Kamber, Kaynak, Y. Atokok. G y Girit.O ^[34] de forma empírica, analizan la relación de la presión en la cavidad así como la temperatura en la superficie del molde con la calidad final de la pieza, empleando transductores de presión y temperatura situados en la superficie de la cavidad. Estos estudios experimentales ponen de manifiesto que estos dos factores inciden determinante en la calidad final de la pieza.

Zhao, Zy, Liao, L y Tang. F ^[35] en su artículo describen la importancia del software MoldFlow Plastics Insight como una herramienta indispensable para el optimizado de las variantes de inyección así como para la determinación dimensional de distintos componentes del molde, como son las entradas del material, situación de los canales de refrigeración, etc.

Hasta aquí una muestra de estudios realizados cuya meta es la de optimizar los parámetros de inyección con la finalidad de obtener unas variables de respuesta determinadas, la metodología es diferente para llegar a este fin, los métodos de Taguchi, redes neuronales, superficies de respuesta, ANOVA, DOE, solos o combinados son los empleados mayoritariamente para la resolución de los problemas.

Observando los casos analizados llegamos a la conclusión de que toda la problemática de optimización se reduce a estos 3 casos:

1. Optimización de las variables de inyección para la minimización de defectos, líneas de soldadura, deformación contracción, etc.
2. Optimización de parámetros dimensionales del molde como puede ser la sección de la entrada del material así como su posición, o bien la sección y posición de los canales de refrigeración.

3. Optimización de dimensiones de la pieza con el fin de mejorar las condiciones de inyección, sobre todo espesores.

1.1. INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Como base de partida en cualquier trabajo científico, es de vital importancia considerar la documentación previa referida al tema de estudio, como un elemento decisivo a la hora de plantear la viabilidad del mismo y establecer las vías oportunas para alcanzar los objetivos planteados. Por este motivo, se ha realizado en el presente trabajo, como paso previo al estudio posterior, una revisión bibliográfica referente al optimizado de las variables de inyección a través de herramientas CAD-CAE, con el fin de establecer una base sólida de documentación que sirva de apoyo al estudio posterior.

La plataforma más utilizada para la búsqueda de artículos y trabajos relacionados con el tema del optimizado de parámetros de inyección a través de herramientas CAD-CAE es la "SCOPUS", esta base de datos está producida por *Elsevier* y engloba la mayor parte de resúmenes, actas de conferencias, web científicas, referencias bibliográficas y índices de más de 16.000 revistas con peer review de ciencias, tecnología, medicina y ciencias sociales.

Scopus evalúa anualmente las propuestas de incorporación de nuevas publicaciones mediante un consejo de especialistas. A finales de año se informa de la revisión y si son seleccionadas se incorporan a la base de datos.

Es la mayor base de datos de resúmenes que proceden de más de 4.000 editoriales internacionales. Tiene un acceso a unos 25 millones de resúmenes desde 1996 y 5 años retrospectivos de referencias. Representa aproximadamente el 80% de las publicaciones internacionales revisadas por especialistas, esto permite asegurar un contenido de calidad. Se actualiza semanalmente.

Scopus por tanto actúa como un sencillo y único portal de acceso para los usuarios, es tan fácil de utilizar como "Google".

Su cobertura es la siguiente:

- Química, Física, Matemáticas e Ingeniería con 5.400 publicaciones
- Ciencias de la Vida y de la Salud con 6.300 publicaciones y la cobertura 100% de Medline
- Ciencias Sociales, psicología y Económicas con 1.975 publicaciones

En esta investigación se emplearán diferentes funciones de búsqueda y diferentes palabras claves las cuales se utilizarán en los diferentes temas propuestos inicialmente para el comienzo de la revisión bibliográfica como se verán en capítulos posteriores.

La elección de las distintas palabras clave es de vital importancia para conseguir un buen resultado de búsqueda, además la base de datos permite el uso de operadores “booleanos” que permiten combinar diferentes búsquedas realizadas.

En el presente estudio se han utilizado las *siguientes palabras* clave de búsqueda utilizando la lengua inglesa por su gran supremacía en el mundo científico:

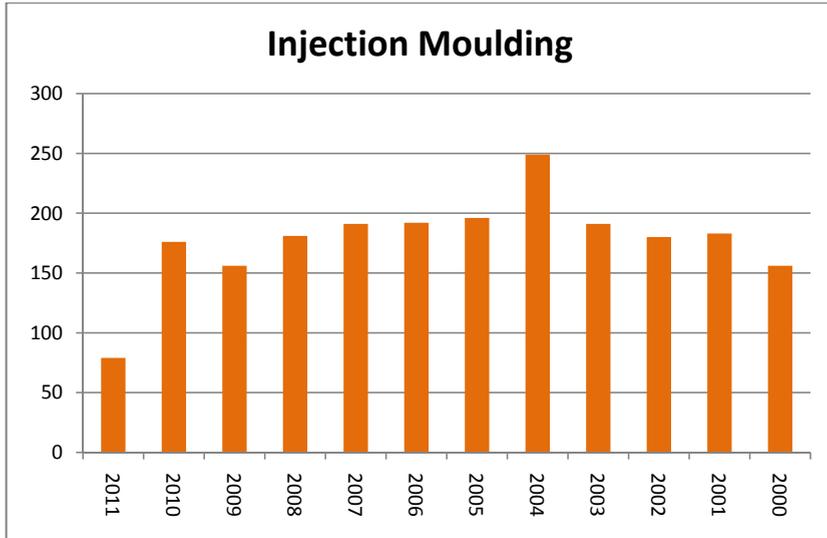
- Injection Moulding. (encontradas 2015 publicaciones)
- Optimization (encontradas 241 publicaciones)
- Thickness. (encontradas 199 publicaciones)
- Response surface. (encontradas 60 publicaciones)
- MoldFlow. (encontradas 68 publicaciones)
- Part geometry. (encontradas 159 publicaciones)
- Defects. (encontradas 126 publicaciones)
- Part dimensions. (encontradas 67 publicaciones)

Finalizada la búsqueda se han encontrado 902 artículos, de los cuales quedan 756 eliminando los artículos duplicados y los no relacionados con la temática. El uso de operadores booleanos como “and”, “or” y “not” permite la combinación de las palabras clave y de este modo filtrar la información y obtener los artículos directamente relacionados con el optimizado de variables del proceso de inyección. En este caso se ha empleado la opción AND acompañando a la palabra clave de Injection Moulded.

1.2. ESTADÍSTICA DE LOS ARTÍCULOS REFERENTES AL TEMA DE ESTUDIO

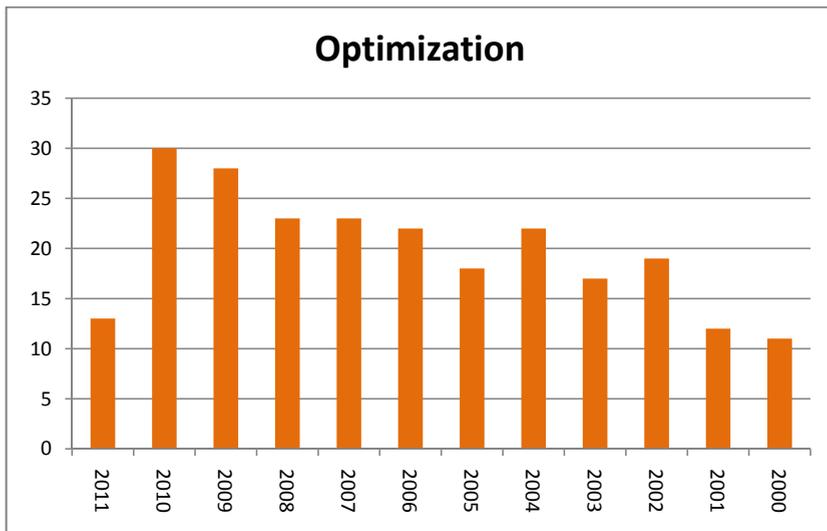
En base a las palabras clave empleadas y con el fin de analizar y observar la tendencia del interés de este estudio a continuación haremos una valoración estadística por años de los artículos editados referente a este tema de estudio partiendo desde el año 2000 hasta el año actual.

La primera palabra clave que introducimos en la base de datos es “injection moulding” y los resultados obtenidos son los siguientes:



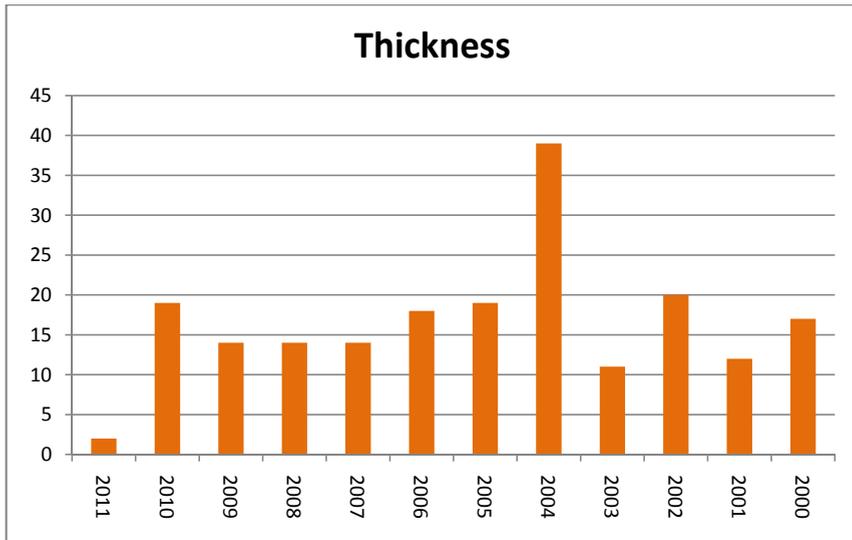
Grafica 1: Diagrama de barras para la keyword "injection moulding"

En nivel de estudios referido al moldeado por inyección se mantiene constante a lo largo del tiempo.



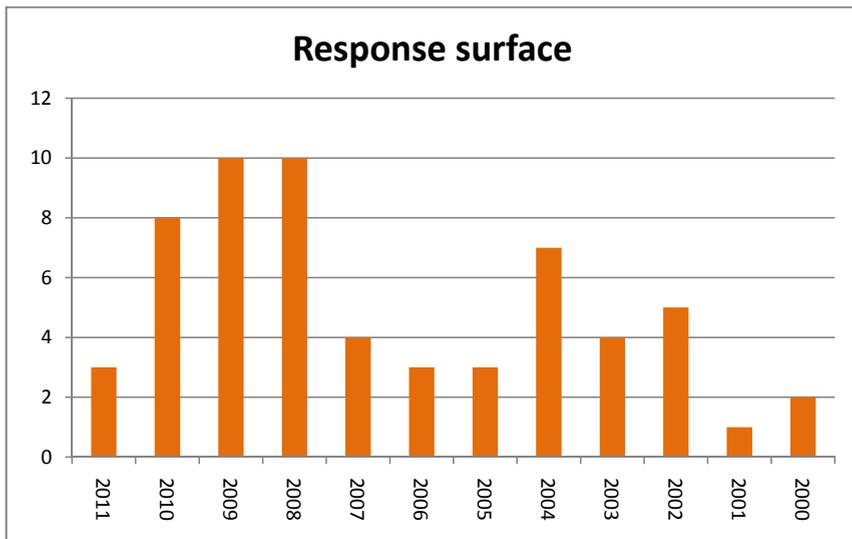
Gráfica 2: Diagrama de barras para la Keyword "optimization"

En este caso la tendencia es al alza, por lo que el interés del tema de optimización de parámetros es creciente.



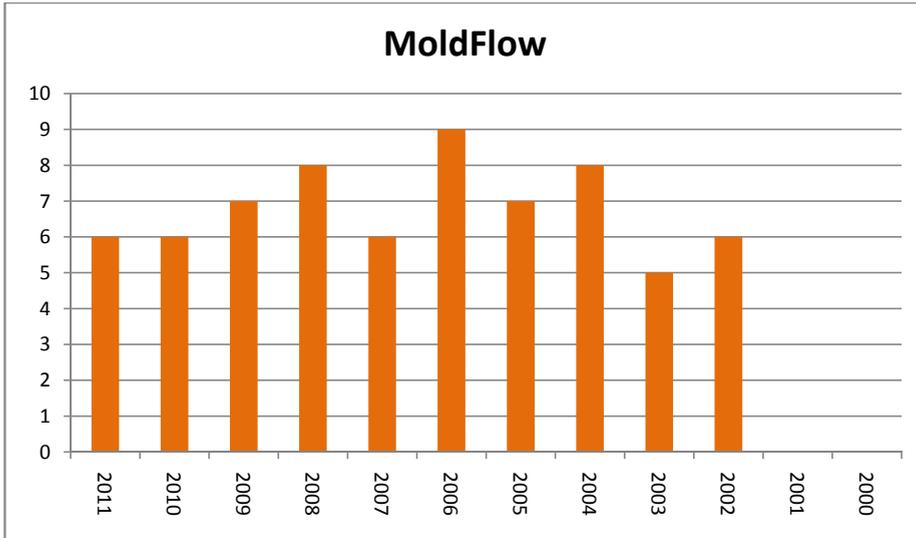
Gráfica 3: diagrama de barras para la Keyword "Thickness"

Esta keyword no denota una tendencia clara, podemos decir que exceptuando el año 2004 donde existen mayor número de publicaciones, la tendencia es a mantenerse.



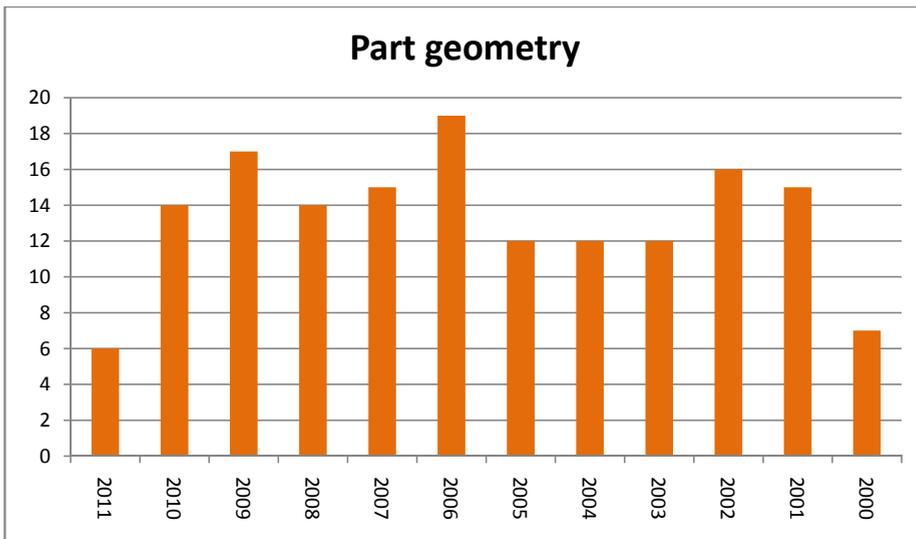
Gráfica 4: diagrama de barras para la keyword "response surface"

Este método para el optimizado tiende a decaer, aunque a partir del 2008 se ha empleado bastante, aún así en el año 2010 permanece en un nivel de empleo relevante.



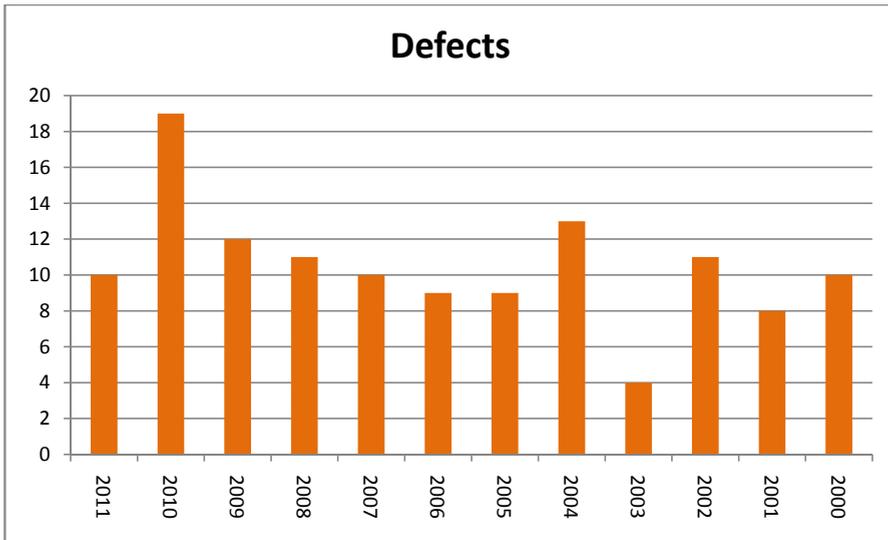
Gráfica 5: Diagrama de barras para keyword "MoldFlow"

Podemos decir que muestra cierta tendencia de constancia, manteniéndose entre 5 y 10 publicaciones por año referentes a esta herramienta CAE.



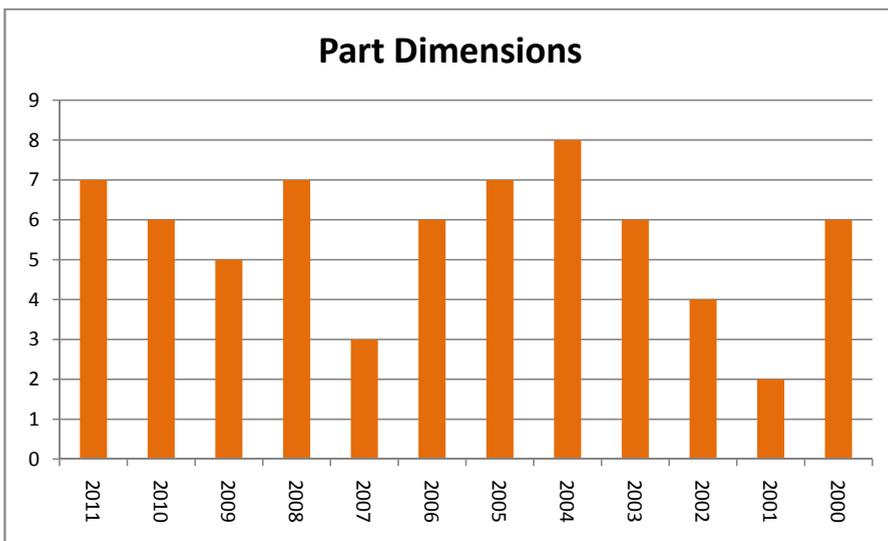
Gráfica 6: Diagrama de barras para Keyword "Part geometry"

El interés por la geometría de la pieza parece que empieza a tomar importancia a partir del 2006 la fecha es coincidente con el aumento de interés del empleo de herramientas CAE como el MoldFlow.



Gráfica 7: diagrama de barras para keyword "Defects"

El estudio de los defectos en la inyección de termoplásticos toma relevancia también desde el 2006.



Gráfica 8. Diagrama de barras para Keyword "Part dimension"

El nivel de estudios con respecto a este tema se mantiene a lo largo de los años, exceptuando el año 2007 y el año 2001 donde tenemos el nivel de estudios muy por debajo de la media.

Objeto del estudio

2. Objeto del estudio

2.1. OBJETO

El presente trabajo sirve como tesina final del “Máster de Dibujo y fabricación asistido con computador realizado en La Universidad Politécnica de Valencia.

Lo que se pretende con este estudio es ver de qué forma son afectadas las variables de inyección en la fase de llenado y en la fase de compactación al modificar las variables independientes del ancho y largo y espesor de una pieza. Las dimensiones de ancho y el largo de la pieza vienen relacionadas a través de un parámetro al que llamaremos “relación A/B”, que resulta ser el cociente entre el ancho y el largo.

$$\text{Relacion } A/B = \frac{\text{Ancho } (A)}{\text{Largo } (B)}$$

Este estudio abre las puertas a otros estudios similares donde podría ser ampliado en un futuro por nuevos estudios enfocados a ver y analizar otras formas y como se comportan éstas frente al proceso de inyección de termoplásticos.

Como varían las condiciones de procesado en base a la forma y a las dimensiones de una pieza nos ayudará a buscar aquellas condiciones que sean favorables en la inyección, y así mismo a definir formas más beneficiosas para que este proceso de inyección sea más eficiente.

El proceso de inyección cubre un 20% a un 30% del coste del producto, no obstante bien es lógico indagar en este proceso para reducir estos costes buscando las formas más adecuadas que cumplan ese difícil equilibrio entre la estética y bajo coste de producción.

Una inyección de termoplásticos mal realizada puede llevar asociados muchos problemas de deformación, de roturas, exceso de tiempos de ciclo por que la forma intrínseca de la pieza no permite una solución de inyección eficaz y rentable. Quizás modificando alguna de sus dimensiones sutilmente pudiera provocar unos cambios en el proceso de inyección que trajeran unos resultados de calidad, de costes, de estabilidad dimensional en la pieza muy superiores a los alcanzados con su forma primitiva.

Todos estos motivos inducen a la necesidad de realizar nuevos estudios destinados a obtener unas formas más cómodas de inyectar y poder adaptar la estética del producto dentro de lo posible a estas formas más eficaces desde el punto de vista de la inyección.

2.2. METODOLOGÍA

Para la mejor comprensión del estudio presente es apropiado saber la secuencia de trabajo y la finalidad de cada una de las etapas.

La pregunta inicial que nos hicimos fue ¿en qué afectan las dimensiones de la pieza y el espesor en las condiciones de inyección? Como base para obtener respuesta a esta pregunta, pensamos que una pieza plana, rectangular y fácil de modificar sería una buena candidata para analizar su comportamiento en la inyección.

Una vez definida la morfología de la pieza, también con el fin de reducir variables, se pensó que sería favorable que las distintas configuraciones de la pieza tuvieran el peso constante y el canal de alimentación de material fijo y solo dejar como aspectos modificables el espesor, el ancho y el largo de la pieza.

A través de un *estudio de diseño* se obtuvieron las distintas configuraciones de las piezas a estudiar que como restricción se impuso el valor del volumen correspondiente a cada una de las series es decir a cada uno de los espesores (estos espesores corresponden a un rango de espesores habitualmente empleado en la inyección de plásticos), con esta etapa se obtuvieron el conjunto de piezas a analizar.

El siguiente paso es el de *optimizar y fijar las distintas variables de entrada* en el proceso de inyección para cada una de las series ya que la diferencia de peso entre las distintas series provoca la necesidad de introducir valores adecuados de estas variables a cada uno de los espesores, estas variables son el tiempo de inyección, la presión de compactación, y tiempo de compactación, aparte de estas variables, se comprobó que la temperatura de masa recomendada por el fabricante era la adecuada para todas las series

Una vez definidos los valores de estas variables para cada serie, el siguiente paso es el de obtener los valores de las variables respuesta en las fases de llenado y fase de compactación, para ello el empleo del MoldFlow es imprescindible.

Por un lado tenemos las dimensiones de las piezas, por otro lado los valores de las variables dependientes del proceso de inyección, solo nos queda *analizar la relación* entre las dimensiones y los valores obtenidos de las variables de inyección.

Dicho análisis va a correr en dos direcciones, la primera es ver de qué forma se relacionan cada una de las variables con las dimensiones de la pieza, esto lo haremos

inicialmente viendo la relación de la variable a estudio con el espesor y luego con la relación A/B, y luego la influencia de las variables dependientes bajo la variación dos variables dimensionales que se analizan.

La segunda dirección del análisis y aprovechando las conclusiones de la primera fase de análisis, es obtener la configuración de espesor y relación A/B que minimiza las variables dependientes de inyección.

2.3. ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance del estudio solo implica de qué forma son afectadas variables dependientes de la inyección en su fase de llenado y de compactación, incluyendo la deformación tras la fase de compactación, no se estudian variables referidas a la refrigeración.

También se analizará una por una de las variables la relación que tienen con las variables independientes de ancho, largo (relación A/B) y espesor de la pieza. Concluyendo si entre dichas variables y las variables independientes existe una correlación entre ambas.

El *tiempo de enfriamiento* no queda determinado por ningún método de optimizado ya que esta variable al ser un elemento asociado a la refrigeración queda fuera del alcance de este trabajo. Dado que con el tiempo de compactación, la pieza queda completamente preparada para la expulsión, se le asigna 1 segundo de tiempo de enfriamiento (*ver optimizado de presión de compactación pag. 66*).

Variables a estudio

3. Variables a estudio

Las variables cuyo comportamiento se va a analizar en el presente estudio se reflejan en la tabla inferior donde hay que diferenciar entre las variables independientes y las variables dependientes que dependen de las primeras.

<u>Variables</u>	<u>Variables dependientes en la fase de llenado</u>
<u>Independientes</u>	
Espesor	Fuerza de cierre
Ancho (A)	Presión de inyección
Largo (B)	Tª de masa tras el llenado.
	Diferencias de Tª en masa tras el llenado.
	Tensión de cizalla
	Velocidad de cizalla.
<u>Variables dependientes en la fase de compactación</u>	
<u>compactación</u>	<u>Variables optimizadas y constantes para cada serie</u>
Máxima presión en pieza (MP)	Tiempo de inyección
Pico mínimo de presión (PM)	Presión de compactación
Diferencia entre MP y PM	Tiempo de compactación
Fuerza de cierre	Tª de masa
Deformación	
Contracción volumétrica.	

3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

Estas variables independientes son las que forman parte del propio diseño de la pieza, decimos que son independientes ya que se han seleccionado manteniendo un patrón de diseño y el resultado no depende de ningún otro parámetro. Para ver cuál ha sido el mecanismo de selección de estos parámetros hay que remitirse al apartado 6 de *estudio de diseño*. A continuación describen estos parámetros.

Espesor: Referido al espesor de la pieza, este varía con los valores siguientes:

- 2 mm para la serie A
- 1,5 mm para la serie B
- 1 mm para la serie C

Ancho (A): Referida a la dimensión (A) según la *tabla 1 (pag 26)*, ésta va variando a lo largo de todas las disposiciones desde 20 mm hasta 100 mm tomando 13 longitudes distintas,

siempre es paralela a la dirección del canal de distribución. Siempre toma los mismos valores para cada una de las series, estos valores se pueden ver en las *tablas 1, 2, 3 (pag 26, 27, 28)*.

Largo (B): Referida a la dimensión B según la *tabla 1 (pag 26)*, esta va variando al igual que la variable del ancho, desde 20 mm hasta 100 mm tomando 13 valores distintos, estos valores se pueden ver en las *tablas 1, 2, 3 (pag 26, 27, 28)*. Siempre es perpendicular a la dirección del canal de distribución.

Relación (A/B): Referida a la relación entre el ancho y el largo, ya que ambas medidas (A y B) varían simultáneamente de forma inversa hemos de relacionarlas para obtener resultados que se puedan obtener como consecuencia de las dos modificaciones a la vez.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES EN FASE DE LLENADO.

En esta fase de llenado las variables que se analizan inciden directamente sobre la calidad de la inyección haciendo que esta inyección sea mucho más eficiente, es a partir de estas variables donde se puede detectar y a la vez corregir un exceso de gasto energético, o bien una posible degradación del material si algunas de las variables sobrepasan los límites establecidos por el fabricante. También se puede ver diferencias de tiempos de ciclo entre los distintos candidatos a analizar. Estas variables se detallan a continuación:

Fuerza de cierre en la fase de llenado: Es la fuerza con la que se opone el mecanismo de la máquina para evitar la apertura del molde al inyectar, esta depende de la presión de inyección y de la superficie proyectada de la pieza. La presión de inyección depende de la velocidad de inyección y del punto de swich-over, momento a partir del cual el husillo pasa de estar regulado por la velocidad de inyección a presión de inyección. Valores de fuerza de cierre elevados producen sobretensiones en los elementos de máquina, y un mayor consumo energético, es por ello que es recomendable emplear una fuerza de cierre lo suficientemente baja como para evitar las rebabas. La velocidad de inyección depende de factores como temperatura de masa y del molde o la propia naturaleza del material.

Presión de inyección en fase de llenado: Presión necesaria para introducir el material dentro de la cavidad, viene determinada por la velocidad de inyección, la máquina ejerce la presión automáticamente según las necesidades de llenado de la máquina y según el tiempo de llenado. A igual que la fuerza de cierre un exceso de presión genera un aumento energético y el sometimiento a la máquina a más tensión así como a la disminución de las características

mecánicas por degradación del material, pero un valor bajo de presión podría impedir el llenado del molde. Se debe buscar la presión de inyección suficiente para garantizar el llenado completo del molde, sin excedernos de este punto, por lo tanto la mejor presión, será la más baja.

Temperatura de masa durante el llenado 95%: El material al ser introducido bajo presión dentro de la cavidad sufre un aumento de la temperatura este aumento podría superar los límites recomendados por el fabricante y degradar el material, siempre que estemos dentro de los límites del fabricante no existe riesgo de degradación, pero un aumento excesivo de esta temperatura con respecto a la temperatura de masa durante el llenado puede suponer también un aumento en los parámetros de enfriamiento de la pieza, lo que supondría un sobrecoste. Lo oportuno es minimizar esta variable. Por otro lado si trabajamos con una temperatura estable en la inyección garantizan que no habrá una variación de la viscosidad, lo cual podría implicar tensiones internas en el material.

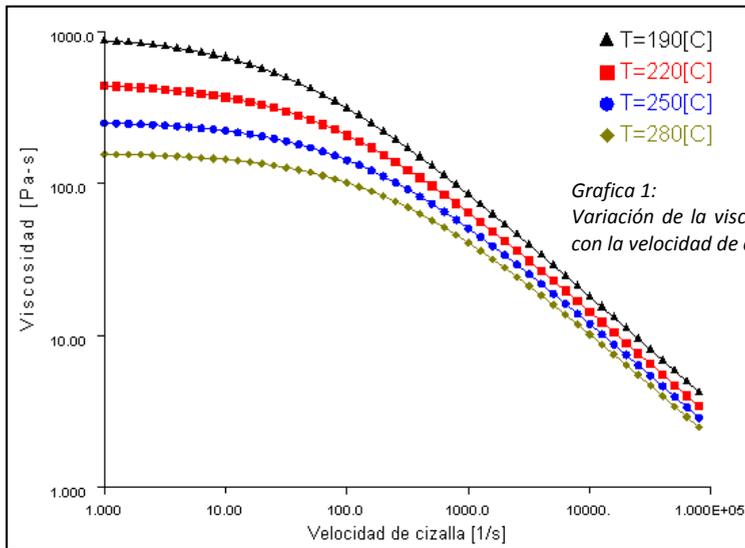
Diferencia de temperatura en pieza tras el llenado: Este dato nos indica cuanto de homogénea es la temperatura dentro de la pieza tras el llenado, contra más homogénea sea la temperatura dentro de la pieza menores serán las tensiones internas posteriormente, disminuyendo deformaciones, y contracciones volumétricas heterogéneas. Por lo tanto hemos de tender a minimizar este valor.

Tensión de cizalla durante el llenado: Esta no debe sobrepasar los valores recomendados por el fabricante y mientras estemos por debajo del valor recomendado iremos a los valores más bajos. La tensión de cizalla es la fuerza con la que se mueve el flujo, es la que determina la deformación del flujo en su avance.

Velocidad de cizalla: La velocidad de cizalla debe ser mínima para que no varíe en exceso la viscosidad del material (*ver relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalla en la gráfica 1*), también genera un aumento de la temperatura de forma descontrolada pudiendo llegar a degradar el material, una variación excesiva de la viscosidad puede dar lugar a problemas de moldeo como:

- Superficies con imperfecciones
- Llenado no uniforme del molde.
- Densidad no uniforme.
- Tensiones internas
- Alabeamientos.

- Diferencias de la contracción lineal.



Gráfica 9: Variación de viscosidad con la velocidad de cizalla

3.3. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES EN FASE DE COMPACTACIÓN.

En esta fase se pone de manifiesto la calidad de la pieza, las variables que aquí se inciden directamente sobre la contracción, las deformaciones, alabeos y rechupes. Al igual que las variables en la fase de llenado también podemos prever cual será el tiempo del ciclo. Estas variables se describen a continuación.

Máxima presión en pieza: se refiere a la máxima presión alcanzada en cavidad que como es lógico se dará justo a la entrada a la cavidad, a partir de este punto la presión empieza a caer según el flujo va avanzando.

Pico mínimo de presión: se refiere a la presión más elevada que se obtiene en el punto más alejado de la entrada de material.

Diferencia entre máxima presión en pieza y pico mínimo de presión: las máximas presiones que se dan en las distintas curvas de presión en cada punto de la cavidad deben ser lo más homogéneas posibles, es decir que la diferencia entre ambos parámetros debe ser la mínima, con el fin de evitar deformaciones y tensiones internas.

Fuerza de cierre en la compactación: Al igual que la fuerza de cierre en el llenado un exceso de ésta genera un sobrecoste energético, así como una tensión superflua de los elementos de la máquina, por lo tanto tenderemos a la mínima fuerza de cierre siempre que sea capaz de contrarrestar el empuje de la presión de compactación.

Deformación. En la mayoría de los casos viene dada por la contracción diferencial, influye de forma importante la longitud de flujo, en cualquier caso siempre debemos ir al mínimo para garantizar una estabilidad de forma.

Contracción volumétrica: Determina la reducción del volumen de la pieza con respecto a las dimensiones del molde en frío, la contracción ejerce una influencia fundamental sobre la deformación de la pieza. El efecto de la contracción debe ser el mínimo, pero por otro lado la contracción volumétrica depende en gran medida de la posición del punto de entrada de material, es por ello que se tendrá en cuenta esta variable solo en caso de desempate.

3.4. PARÁMETROS DE PROCESADO A OPTIMIZAR.

Los parámetros que aquí se describen deben optimizarse previamente para cada una de las series ya que son parámetros de procesado cuyo valor se debe ajustar de forma coherente adaptándolo a las formas y necesidades de procesabilidad de cada serie, estos parámetros se mantendrán constantes para cada serie, o incluso algunos de ellos se mantienen constante en todas las series.

Swich-Over: Como se ha dicho anteriormente es el punto de conmutación entre velocidad de inyección y presión de inyección, este punto se da con un valor del porcentaje del volumen total a inyectar, para todos los estudios se ha elegido el valor de 95% de volumen de inyección.

Velocidad de inyección: se ha decidido para evitar exceso de variables mantener la velocidad de inyección automática, la cual dependerá de material, de las temperaturas implicadas en el proceso, el tiempo de inyección, etc. No se aplica ninguna rampa de velocidades en el transcurso del llenado, dado que la pieza tiene el espesor constante.

Temperatura del molde: Ésta permanece bajo los valores recomendados del fabricante del material.

Temperatura de masa: esta se ha optimizado tratando de encontrar la mejor temperatura de masa utilizable en todos los estudios con el fin de eliminar variables, al final del proceso de

optimizado, se ha llegado a la conclusión de que una temperatura válida para todos los estudios es la de 235°C. (*Ver proceso de optimizado de la temperatura pag. 62*).

Presión de compactación: Al igual que la temperatura de masa también se ha intentado encontrar una presión de compactación, válida para cada uno de los estudios, llegando a la conclusión de que una presión de compactación del 90% es adecuada para todos los estudios. La presión de compactación es la presión que ejercemos tras el llenado, para seguir llenando la cavidad de la pieza con el fin de contrarrestar la pérdida de volumen por contracción del plástico. (*Ver proceso de optimización de la presión de compactación pag 66*).

Tiempo de llenado: Es el tiempo que determina la fase de llenado del molde, y consecuentemente la velocidad de inyección, actúa directamente sobre el tiempo de ciclo y sobre la rentabilidad del proceso, pero por otro lado, tiempos de llenado muy bajos hacen aumentar la presión de inyección (aumento del consumo energético y sobretensión en los elementos de máquina) y aumentan la tensión de cizalla y velocidad de cizalla, cuyos valores elevados pueden degradar el material y reducir sus propiedades mecánicas. En este caso también se ha tratado de encontrar un valor de tiempo de inyección adecuado a todos los estudios, pero dada la variación de volumen que se da en cada serie, es desaconsejable emplear siempre el mismo tiempo de llenado, por lo que se ha optado por encontrar el tiempo adecuado a cada una de las series, los valores empleados son (*ver apartado de Optimización de los tiempos de llenado pag 57*):

- **Serie A:** 0,7 sg
- **Serie B:** 0,5 sg
- **Serie C:** 0,3 sg.

De esta forma a pesar de que se rompe la uniformidad del proceso en cuanto a los parámetros de máquina nos aseguramos de que cada una de las series están comandadas por parámetros de procesamiento adecuados a las necesidades de la pieza, y las variables resultantes (los datos) no se salen de resultados reales.

Estudio de diseño

4. Estudio de diseño

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

El material que se va emplear para realización de los estudios es un polipropileno, más concretamente el ISPLEN PR-290 X9M de la firma Repsol. Los polipropilenos en general tienen las siguientes características:

Propiedades generales del polipropileno		
Densidad	0.91-0.93 g/cm ³	
Resistentes a	Ácidos, lejías, soluciones salinas, alcoholes, gasolina, zumos de fruta y aceites.	
No resistentes a	Hidrocarburos clorados. Evitar el contacto con el cobre, No tiende a agrietarse por tensiones.	
Temperaturas en el cilindro	Brida 1	20-30 C°
	Zona 1	150-210 C°
	Zona 2	210-250 C°
	Zona 3	220-250 C°
	Zona 4	220-250 C°
	boquilla	240-260 C°
Presión de inyección	Se precisa alta presión (1200 -1800 bar)	
Presión remanente	Para evitar rechupes se necesita un tiempo de remanencia muy alto (aprox 50%) de la duración del ciclo, y entre un 40% y 80% del valor de la presión de remanencia.	
Contrapresión específica	100-200 bar	
Velocidad de inyección	Se precisa alta velocidad de inyección	
Revoluciones husillo	Pueden aplicarse las máximas revoluciones.	
Cojín material	2-6 mm según volumen dosificado.	
Temperatura del molde	20-60 C°, contra más alta mejor es el acabado superficial	
Contracción	1,2-2,2 %	
Paro de máquina	No es necesario purgar con otro material	
Datos del material en MOLDFLOW		
Tª superficie molde	Recomendado 60 C°; min 40 C°; max 80 C°	
Tª masa fundida	Recomendado 235 C°; min 190 C°; max 280 C°	
Temperatura de expulsión	101 C°	
Esfuerzo de cizalla máximo	0.25 Mpa	
Velocidad de cizalla	100.000 1/s	

Tabla 1: Propiedades del Polipropileno (PP)

4.2. ESTUDIO DE DISEÑO DE LAS PIEZAS

El estudio de diseño de las distintas piezas se ha realizado a través del software Solidworks en su versión 2010.

Se diseñó una pieza plana que llegara a cumplir las necesidades de nuestro estudio, es decir que permitiera de una forma fácil observar la relación entre la disposición de la pieza y el comportamiento en la fase de inyección, para ello pensamos en una pieza sencilla que fuera fácilmente parametrizable pero que nos diera la posibilidad de hacer modificaciones importantes en cuanto a sus dimensiones.

Dado que lo que deseamos obtener es la relación existente entre la relación A/B y las variables características en el proceso de inyección, se ha escalonado el rango de valores que va desde 0,25 a 4 dentro de la relación A/B en trece escalones cada uno de ellos será una pieza a analizar con unas dimensiones distintas al resto de las piezas de la misma serie. Por otro lado como también queremos observar cual es el comportamiento de la relación entre las variables del proceso y el espesor, hemos procedido a realizar los mismos estudios para las mismas piezas pero con espesor distinto. El espesor está en 2mm, 1,5mm y 1 mm. Obteniendo así tres series de 13 piezas cada 1 de ellas, en total 39 piezas.

Por otro lado para eliminar variables se ha decidido mantener constante el volumen de la pieza en cada una de las piezas. Para la obtención de las piezas correspondientes a cada una de las series con la condición de que el espesor y volumen fuera constante dentro de una misma serie se obtuvieron las dimensiones de las variables paramétricas A y B a través del programa SOLIWORKS, empleando la opción que tiene dicho programa para tal efecto, llamada *estudio de diseño*.

Para realizar el *estudio de diseño* hemos de indicarle tres tipos de datos, en primer lugar las dimensiones que pueden variar (en este caso ha sido el valor del ancho y el largo), en segundo lugar introducimos la restricción (*figura 2*), es decir aquella característica que deseamos que se quede entre unos valores máximo y mínimos en este caso ha sido el volumen la restricción que la hemos mantenido entre 11.135 mm³ y 11.145 mm³, y por último marcar un objetivo, en este caso también ha sido el volumen dado que queremos que sea constante y el valor ha sido de 11.139 mm³ (datos de la serie A). Una vez introducido estos valores, le damos a ejecutar proceso y me devuelve un abanico de posibles candidatos con medidas de ancho y largo distintas y que cumplen con las restricciones introducidas, de todas ellas se escogen aquellas opciones más adecuadas para realizar los estudios (*figura 1*).

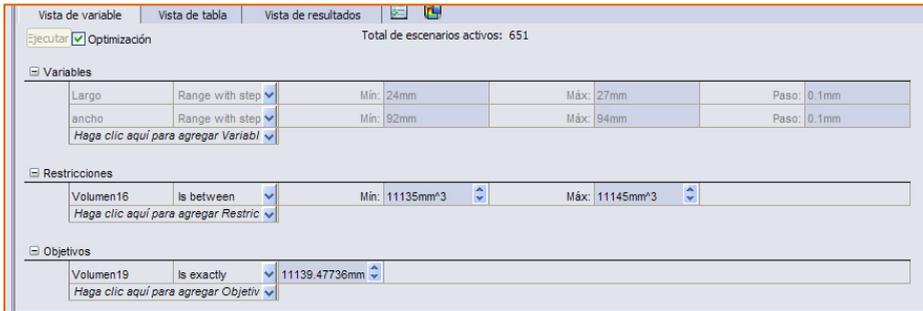


Figura 2: Menú inicial estudio de diseño de SolidWorks

The screenshot shows the 'Resultados' (Results) table in SolidWorks, displaying 11 scenarios. The table includes columns for 'Current', 'Initial', 'Optimal', and scenarios 44 through 49. The 'Current' column shows the current values for 'Largo', 'ancho', 'Volumen16', and 'Volumen19'. The 'Initial' and 'Optimal' columns show the initial and optimal values for these variables. The 'Scenario' columns show the values for each scenario.

	Current	Initial	Optimal	Scenario 44	Scenario 45	Scenario 46	Scenario 47	Scenario 48	Scenario 49
Largo	26.5mm	26.5mm	27mm	25.2mm	25.3mm	25.4mm	25.5mm	25.6mm	25.7mm
ancho	91mm	91mm	92.6mm	92.1mm	92.1mm	92.1mm	92.1mm	92.1mm	92.1mm
Volumen16 [11135mm³ ~ 11145mm³]	10785.4773	10785.4773	11140.27736	10423.15744mm³	10459.99745mm³	10496.83746mm³	10533.67747mm³	10570.51747mm³	10607.35747mm³
Volumen19 [11136e-005 11139e-005]	10785.4773	10785.4773	11140.27736	11823.45072mm³	11785.14405mm³	11747.34227mm³	11710.04538mm³	11673.25338mm³	11636.96626mm³

Figura 1: Escenarios propuestos por SolidWorks

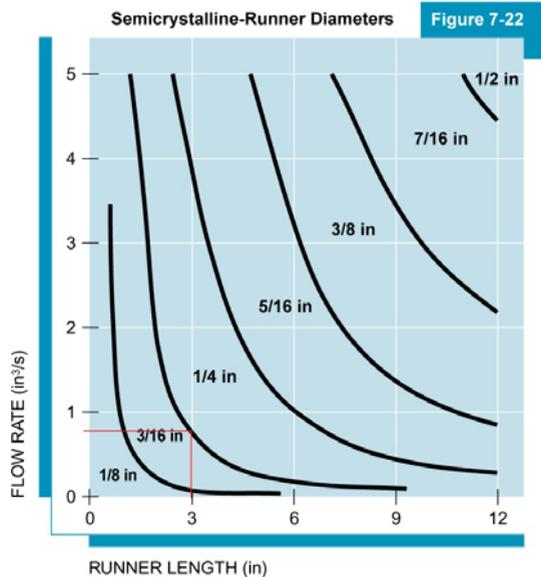
Una vez obtenidas las piezas candidatas para realizar el estudio, se procede a grabar cada una de estas piezas como una configuración de la pieza, esto nos permite tener toda la familia de piezas en un mismo archivo, y disponer posteriormente de la pieza que deseemos.

Con cada una de estas piezas o configuraciones distintas las guardamos en formato STL (solido mallado) para después poderlas abrir en el software de análisis finitos MoldFlow.

Una vez abiertas en el MoldFlow, se mallan y se repara la malla para reducir la relación de aspecto de los triángulos y para que esta relación sea homogénea en todos los estudios a realizar, de esta manera eliminamos un posible factor de ruido sobre los análisis de la inyección.

4.3. BEBEDERO Y CANAL DE DISTRIBUCIÓN

Para simplificar los estudios con el MoldFlow, se ha incluido en la misma pieza el bebedero, si no es así, cada vez que realizáramos un estudio con el MoldFlow tendríamos que diseñar el bebedero. La forma y el volumen del bebedero permanecen constantes a lo largo de todas las configuraciones de las piezas y para el diseño del mismo se ha tratado de encontrar una solución intermedia empleando el siguiente grafico [21].



Runner-diameter guidelines based on volumetric flow rate and runner length.

Figura 3: Gráfica para el cálculo del diámetro del bebedero

Este gráfico representa el diámetro del bebedero principal en función de la longitud del bebedero y la velocidad del flujo que se obtiene dividiendo el volumen a inyectar entre el tiempo de llenado.

Si adaptamos los valores dimensionales del bebedero actual que da entrada al material en la pieza tenemos que para un diámetro de la boquilla de 5 mm (aproximadamente 3/16 in) y una longitud de bebedero de 76 mm in (aproximadamente 3 in) le corresponde una velocidad del flujo de 0,8 in³/s. Se obtienen los datos siguientes con la formula:

$$\text{velocidad de flujo} = \frac{\text{volumen pieza}}{\text{tiempo de llenado}}$$

$$\text{Tiempo de llenado} = \frac{\text{Volumen pieza}}{\text{Velocidad de flujo}}$$

	Volumen (mm³)	Volumen (in³)	Tiempo inyección (s)
Serie A	11.139	0,64	0,8
Serie B	8.639	0,52	0,65
Serie C	6.139	0,37	0,46

Tabla 2: Volúmenes de las distintas series

Los tiempos de inyección obtenidos entran dentro de los tiempos calculados con el MoldFlow para cada serie, por lo tanto damos por validas las dimensiones de nuestro bebedero. Una vez tenemos dimensionados el cono del bebedero diseñamos los canales de distribución, según la guía de diseño de moldes de Bayer [21], la sección total de las secciones de los corredores de distribución debe ser igual a la sección del bebedero principal, en este caso tenemos que la sección máxima de la caña del bebedero es de:

$$Seccion_{caña\ bebedero} = \pi r^2 = \pi \cdot 2.25^2 \approx 20\ mm^2$$

$$seccion_{canal\ distribución} = \frac{Seccion_{caña\ de\ bebedero}}{n^{\circ}\ de\ canales} = \frac{20}{2} = 10\ mm^2$$

Los canales de distribución deben tener 10 mm² de sección.

En cuanto a la sección elegida se corresponde a una sección trapezoidal y cilíndrica como se aprecia en la imagen inferior (figura 4).

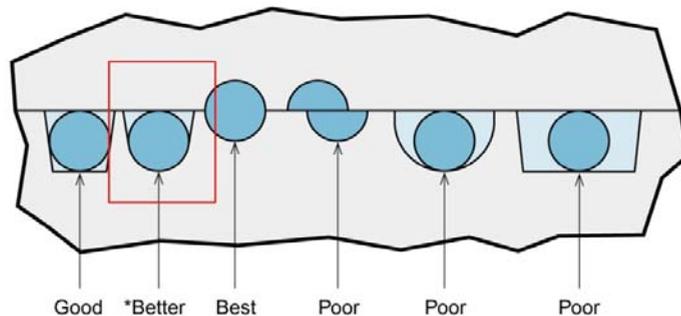


Figura 4: Selección de la sección del bebedero

En cuanto a la *entrada de material* nos basamos en las siguientes graficas (figura 5) extraídas del libro de Diseño de moldes de inyección de termoplásticos editado por la universidad de valencia [23].

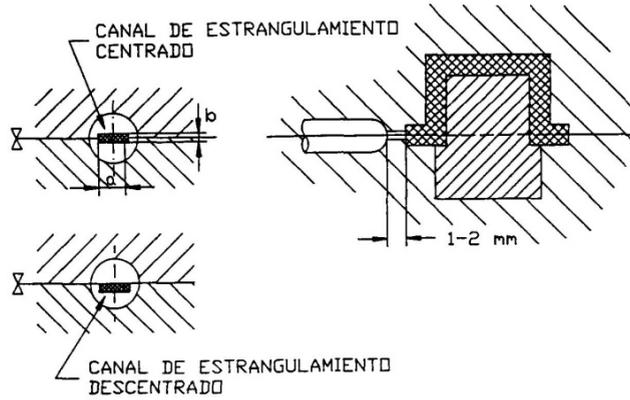


Figura 5: Dimensiones entrada de material

ESPESOR PIEZA (mm)	ATAQUES RECTANGULARES		CIRCULAR
	b (mm)	a (mm)	d (mm)
1	0.8	1.3	1.0
2	1.3	2.0	1.8
3	1.4	2.5	2.5
4	2.5	4.0	3.5
5	3.0	4.5	4.5
6	4.0	5.5	5.5

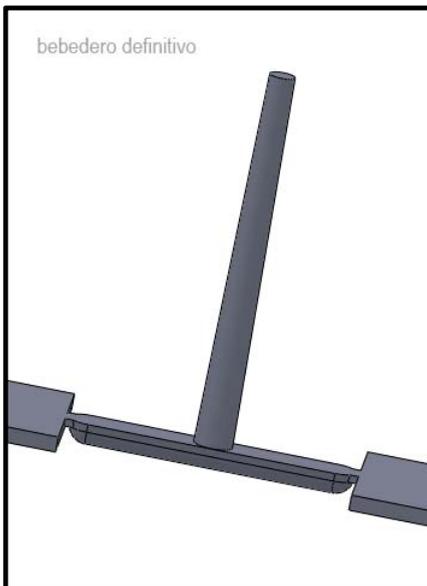


Figura 6: Forma final del bebedero

Una vez definida como se ha realizado la selección de las distintas formas a analizar y de haber diseñado el bebedero como datos que se mantendrán constantes a la largo de todos los estudios pasamos a mostrar las características de las piezas candidatas de todas las series a través de las tablas 3, 4 ,5.

Tabla 1: Serie A 2 mm de espesor

serie A	A	B	Volumen cm ³	Relación A/B	Peso (grs)
Pieza 1A	25	100	11.139	0.25	10.39
Pieza 2A	30.8	81.2	11.143	0.38	10.4
Pieza 3A	38.4	65.1	11.138	0.59	10.39
Pieza 4A	40	62.5	11.139	0.64	10.39
Pieza 5A	43.1	58	11.138	0.74	10.39
Pieza 6A	48	52.1	11.142	0.92	10.4
Pieza 7A	50	50	11.139	1	10.39
Pieza 08A	56.2	44.5	11.143	1.26	10.4
Pieza 09A	70	35.7	11.135	1.96	10.39
Pieza 10A	81.2	30.8	11.143	2.64	10.4
Pieza 11A	92.6	27	11.140	3.43	10.39
Pieza 12A	95.4	26.2	11.137	3.64	10.39
Pieza 13A	100	25	11.139	4	10.39

Otros datos
El volumen permanece constante ente los valores de 11.135 cm ³ y 11.143 cm ³
Se trata de una superficie plana grabada solo en macho con espesor de 2 mm
Swich_over a 95%
Material empleado para el análisis Isplen PR-290 X9M
La relación de aspecto en el mallado esta en 10.71
La temperatura del molde recomendada esta en 60 °C y la de la masa en 235°C
El tiempo de inyección permanece constante en todos los estudios de esta serie, a 0.7 sg.

Tabla 3: Datos definitivos de la serie A

Tabla 2: Serie B 1.5 mm de espesor

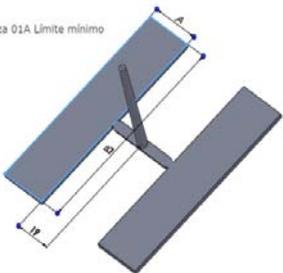
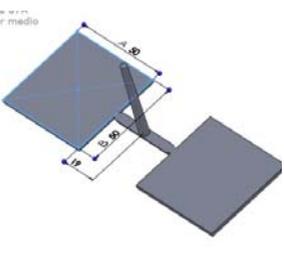
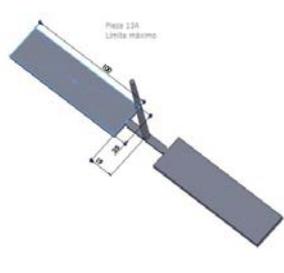
Tabla 2: Serie B 1.5 mm de espesor						
						
Serie B	A	B	Volumen cm ³	Relación A/B	Peso (grs)	Área proyectada
Pieza 1B	25	100	8.639	0.25	8.06	51.96
Pieza 2B	30.8	81.2	8.642	0.38	8.06	51.98
Pieza 3B	38.4	65.1	8.639	0.59	8.06	51.96
Pieza 4B	40	62.5	8.639	0.64	8.06	51.96
Pieza 5B	43.1	58	8.635	0.74	8.06	51.95
Pieza 6B	48	52.1	8.641	0.92	8.06	51.97
Pieza 7B	50	50	8.639	1	8.06	51.96
Pieza 08B	56.2	44.5	8.642	1.26	8.06	51.98
Pieza 09B	70	35.7	8.636	1.96	8.06	51.93
Pieza 10B	81.2	30.8	8.642	2.64	8.06	51.98
Pieza 11B	92.6	27	8.640	3.43	8.06	51.96
Pieza 12B	95.4	26.2	8.637	3.64	8.06	51.94
Pieza 13B	100	25	8.639	4	8.06	51.98
Otros datos						
El volumen permanece constante ente los valores de 8.635 cm ³ y 8.642 cm ³						
Se trata de una superficie plana grabada solo en macho con espesor de 1.5 mm						
Switch_over a 95%						
Material empleado para el análisis Isplen PR-290 X9M						
La relación de aspecto en el mallado esta en 10.71						
La temperatura del molde recomendada esta en 60 °C y la de la masa en 235°C						
El tiempo de inyección permanece constante en todos los ensayos, a 0.5 sg.						

Tabla 4: Datos definitivos de la serie B

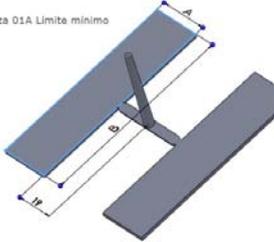
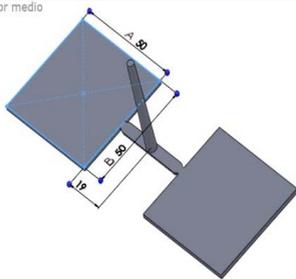
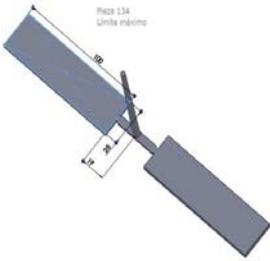
Tabla 3: Serie C 1 mm de espesor						
						
serie C	A	B	Volumen cm ³	Relación A/B	Peso (grs)	Área proyectada
Pieza 1C	25	100	6.139	0.25	5.73	51.96
Pieza 2C	30.8	81.2	6.141	0.38	5.73	51.98
Pieza 3C	38.4	65.1	6.139	0.59	5.73	51.96
Pieza 4C	40	62.5	6.139	0.64	5.73	51.96
Pieza 5C	43.1	58	6.139	0.74	5.73	51.96
Pieza 6C	48	52.1	6.143	0.92	5.73	51.97
Pieza 7C	50	50	6.139	1	5.73	51.96
Pieza 8C	56.2	44.5	6.141	1.26	5.73	51.98
Pieza 9C	70	35.7	6.137	1.96	5.73	51.94
Pieza 10C	81.2	30.8	6.141	2.64	5.73	51.98
Pieza 11C	92.6	27	6.139	3.43	5.73	51.96
Pieza 12C	95.4	26.2	6.138	3.64	5.73	51.94
Pieza 13C	100	25	6.139	4	5.73	51.96
Otros datos						
El volumen permanece constante entre los valores de 6.137 cm ³ y 6.143 cm ³						
Se trata de una superficie plana grabada solo en macho con espesor de 1 mm						
Swich_over a 95%						
Material empleado para el análisis Isplen PR-290 X9M						
La relación de aspecto en el mallado esta en 10.71						
La temperatura del molde recomendada esta en 60 °C y la de la masa en 235°C						
El tiempo de inyección permanece constante en todos los ensayos, a 0.3 sg.						

Tabla 5: Datos definitivos de la serie C

Optimización de los parámetros de proceso

5. Optimizado de los parámetros de proceso

En este apartado se va a describir la forma y los resultados finales del optimizado de aquellas variables que en mayor forma controlan el proceso, estas variables que intervienen de forma directa en los resultados del estudio, se deberían haber asumido como constantes en todos los estudios para reducir variabilidad en los ensayos, pero dada la morfología de las piezas no era posible ajustar dichas variables con la misma magnitud en cada uno de los ensayos ya que no son válidas para todos los estudios. Para minimizar el efecto de variabilidad dentro de todos los estudios, se ha decidido en algunos casos como por ejemplo, la temperatura de la masa fundida comprobar que la temperatura recomendada según el propio programa (MoldFlow) era válida para todas las series, en otros casos se ha determinado en mejor valor de dicha variable que mejor encaja dentro de una misma serie, tal es el caso del tiempo de llenado, que se ha tenido que optimizar para cada una de las series. Veamos cómo se han definido los valores y las conclusiones que nos han llevado a adoptar estos valores.

Añadir por último que en todos estos procesos de optimizado, se ha trabajado de la misma manera y describo a continuación: Para trabajar en esta fase de optimizado se han escogido solo tres piezas de cada una de las series, que son más concretamente las piezas extremas y la central de cada serie, entiendo que si el valor de la variable a estudios es la adecuada para estos tres modelos, lo será también para el resto de la serie.

5.1. OPTIMIZADO DEL TIEMPO DE LLENADO

El punto de inicio en los estudios de MoldFlow, es el de establecer un tiempo de llenado correcto para la pieza que deseamos inyectar, dependiendo de este tiempo, obtendremos mejores o peores resultados en el proceso de inyección, reiterando lo que se dijo ya en el apartado de *parámetros de procesado*, un tiempo de llenado corto, ocasiona un aumento de la presión de inyección, un aumento de la fuerza de cierre, un aumento de la tensión de cizalla, un aumento de la velocidad de cizalla, por otro lado reduce los tiempos de ciclo, es positivo por lo general un tiempo de llenado corto, mientras no se sobrepasen los valores recomendados de temperaturas, tensión de cizalla y velocidad de cizalla.

Se emplearán tiempos de llenado más elevados en piezas con espesor elevado, o si observamos que la superficie no tiene un acabado correcto.

Para el optimizado del tiempo de inyección veremos el comportamiento del proceso en varios escenarios distintos, estos escenarios nos los propone el propio software a través de la opción de análisis de *ventana de procesos*, ofreciéndonos cuales son el tiempo máximo y mínimo recomendable.

Las piezas que estudiaremos en cada una de las series serán la Pieza 01, pieza 07, y la pieza 13, el tiempo más acertado para las tres piezas dentro de una misma serie, será el empleado para todas las piezas de la serie. Por lo tanto iniciamos el análisis con la pieza 01A y veamos los datos que ofrece:

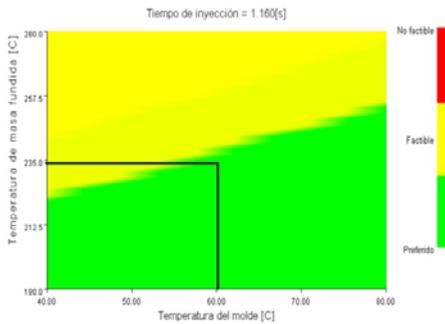


Figura 8: Ventana de procesos (tiempo máximo)

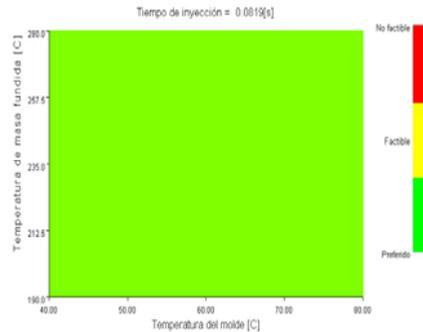


Figura 7: Ventana de procesos (valor mínimo)

En la *figura 8* nos muestra el diagrama de fase (obtenido en la ventana de proceso) que un tiempo máximo válido para la inyección de la pieza es de 1.16 segundos, mientras que en la imagen de la derecha (*figura 7*), nos indica que tenemos un mínimo de tiempo recomendado de inyección de 0.08 segundos, este tiempo es demasiado pequeño para la inyección, en una máquina convencional donde el tiempo de respuesta del sistema hidráulico puede estar en valores mucho más altos, además a valores tan bajos de tiempo de inyección corresponden unas altas velocidades de inyección y un aumento considerable de la tensión de cizalla por ello vamos a un tiempo de inyección que no sea tan bajo y que esté dentro de los límites que sugiere el programa, en esta caso 0,3 segundos, MoldFlow a parte de ofrecernos la ventana de procesos donde se observa el rango de tiempos de llenado máximos y mínimos también ofrece un tiempo de llenado recomendado el cual podemos observarlo en la figura 9.

Fuerza máxima de cierre estimada	7000.22 tonelada
Presión máxima de inyección estimada	: 180.00 MPa
Temperatura del molde recomendada	: 40.00 C
Temperatura de masa fundida recomendada	: 280.00 C
Tiempo de inyección recomendado	: 0.1567 s

Figura 9: Tiempo de inyección recomendado por MoldFlow

Pero los valores de tensión de cizalla asociados a este tiempo de llenado recomendado exceden los valores recomendados (0,25 Mpa) tal y como se puede ver en la Figura 10, definitivamente damos el valor de 0,3 segundos como valor mínimo que nos asegura que la tensión de cizalla no sobrepasa los valores recomendados.

Esfuerzo de cizalla de la pared: máximo	(a 0.030 s) =	0.6639 MPa
Esfuerzo de cizalla de la pared: percentil 95	(a 0.008 s) =	0.2513 MPa

Figura 10: Esfuerzo de cizalla (MoldFlow)

Entre los dos valores límites (*max 1,1 sg y min 0,3 sg*) tomamos un valor más con el fin de obtener un candidato más para nuestra selección, siendo este el valor de 0.7 segundos.

Serie A

El análisis anterior realizado para la serie A se repite en las otras dos series quedando definitivamente de la siguiente forma los tiempos a los que se va a estudiar en proceso de llenado.

serie A	0,3	0,7	1,1
Serie B	0,25	0,5	0,75
Serie C	0,25	0,4	0,6

Tabla 6: Tiempos de llenado para análisis

Los datos que se obtienen para las tres piezas de la serie A son:

Serie A 2 mm espesor	Pieza 01 A			Pieza 07 A			Pieza 13 A		
tiempo hasta switch-over	0,3	0,7	1,1	0,3	0,7	1,1	0,3	0,7	1,1
presión de inyección (MPa)	11,17	7,22	8,45	10,67	7,28	8,01	17,29	11,54	13,68
fuerza de cierre de máquina (T)	4,87	1,28	3,88	4,42	1,35	3,51	6,02	2,09	4,89
Temperatura 95%	237,49	235,72	235,84	237,38	235,74	235,81	238,48	236,46	236,73
Tensión de cizalla 95% max.	0,255	0,1508	0,13	0,2548	0,1057	0,1587	0,2936	0,1145	0,1973
Velocidad de cizalla 95% max.	37738	6973	5435	37397	2568	8294	59323	3207	16144
desviación T (C°)	0,785	2,35	3,35	0,77	2,32	3,28	0,82	2,43	3,65

Tabla 7: Valores de las variables independientes en la fase de llenado para los tiempos de llenado obtenidos en la serie A

En este caso, vemos perfectamente como en valores de tiempo de llenado bajos (0,3 segundos), la velocidad de cizalla (*provoca un aumento descontrolado de la masa fundida*) está muy por encima de los otros resultados, lo que nos inclina a despreciar este tiempo de llenado, si miramos al otro tiempo extremo de 1.1 segundos, nos damos cuenta de que los valores de las variables son desfavorables exceptuando las tensión de cizalla, y la velocidad de cizalla, pero esta situación se da solo para la primera pieza, para la pieza 07 y 13, todos los valores son desfavorables, esto nos lleva a la conclusión de que un **tiempo de llenado de 07 segundos**, es el aceptable.

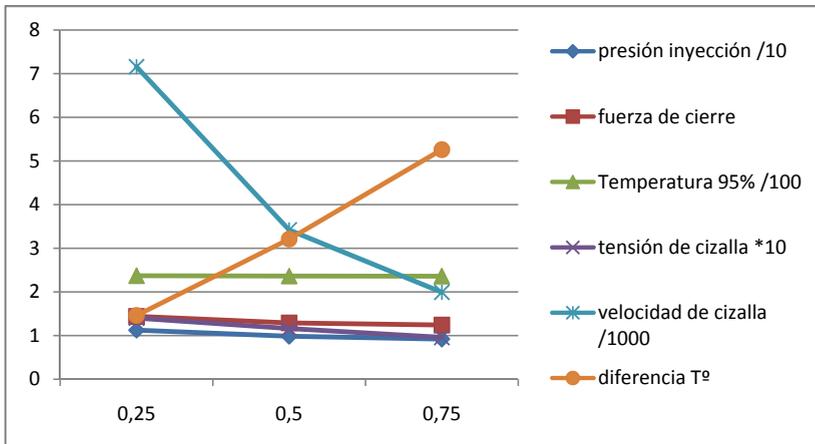
Serie B

Los resultados de las variables para esta serie son los siguientes:

Serie B 1,5 mm espesor	Pieza 01 B			Pieza 07 B			Pieza 13 B		
tiempo hasta switch-over	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75
presión de inyección (Mpa)	11,23	9,84	9,19	11,14	9,74	9,09	19,24	17,33	16,54
fuerza de cierre de máquina (T)	1,44	1,29	1,24	1,44	1,28	1,23	3,59	3,29	3,2
Temperatura 95%	236,96	236,27	235,96	239,62	236,24	235,93	238,27	237,53	237,2
Tensión de cizalla 95% max.	0,14	0,1159	0,0957	0,13	0,1076	0,09	0,13	0,1079	0,1035
Velocidad de cizalla 95% max.	7157	3416	1991	5745	2864	1874	6319	2913	1933
desviación T(°C)	1,46	3,21	5,26	1,48	3,23	5,25	1,29	3,18	5,31

Tabla 8: Valores obtenidos de las variables de llenado con los tiempos de llenado de la serie B

En el caso anterior hemos tenido fácil la decisión pero en este caso la evolución de las variables es distinto al caso de la serie A, veamos cómo evolucionan las variables teniendo en cuenta que esta gráfica corresponde al comportamiento general de las tres piezas de la serie:



Gráfica 10: Variables en la fase de llenado para los tiempos de llenado de la Serie B

Las variables de presión de inyección, fuerza de cierre, temperatura y tensión de cizalla varían poco, mientras que la diferencia de temperatura disminuye considerablemente según aumentamos el tiempo de llenado y la velocidad de cizalla varia considerablemente de forma inversa, para empezar el tiempo de inyección de 0.25 segundos lo descartamos por tener los valores más altos que el resto de las piezas, pero sobretodo, porque la velocidad de cizalla está por las nubes.

La duda se nos plantea ahora entre el tiempo de inyección de 0,5 segundos y el de 0,75 segundos, la mayoría de las variables son más favorables, para el tiempo de 0,75 segundos, puesto que disminuyen aunque sea en poca medida, todas excepto la diferencia de temperatura en el flujo, que da un salto muy elevado con respecto a la de 0,5 segundos, motivo por el cual descartamos este tiempo de 0,75 segundos como tiempo de llenado para esta serie, por lo que nos quedamos con el **tiempo de llenado de 0,5 segundos**.

Serie C

Serie C:1 mm espesor	Pieza 01 C			Pieza 07 C			Pieza 13 C		
tiempo hasta switch-over	0,25	0,4	0,6	0,25	0,4	0,6	0,25	0,4	0,6
presión de inyección (Mpa)	16,59	16,19	14,98	16,75	16,33	15,12	31,73	31,21	30
fuerza de cierre de máquina (T)	2,81	2,77	2,69	2,82	2,77	2,69	6,85	6,76	6,72
Temperatura 95%	237,68	237,51	236,95	237,67	237,5	236,94	239,92	239,74	239,2
Tensión de cizalla 95% max.	0,1354	0,132	0,1211	0,13	0,1309	0,12	0,1518	0,1498	0,144
Velocidad de cizalla 95% max.	4673	3878	1396	4812	3837	1873	4807	4212	1942
desviación T (C°)	3,56	4,43	10,2	3,54	4,42	10,17	3,21	4,12	9,98

Tabla 9: Valores obtenidos de las variables de la fase de llenado con los tiempos de llenado obtenidos en la serie C

En esta serie, el motivo que nos llega a decidir el descarte del tiempo de 0,6 es el mismo que en la serie anterior, las mejoras en casi todas las variables son favorables a este tiempo, pero la variable de la desviación de temperatura está muy por encima de las otras piezas, ahora bien en cuanto a la decisión de escoger entre el tiempo de 0,25 segundos o el de 0,4 segundos, dado que las diferencias son pocas, es más complicado decidir, podemos elegir el tiempo de 0,25 segundos dado que este tiempo a la vez de que es más corto, también tiene menor desviación de temperatura, pero un tiempo tan pequeño, a efectos prácticos no suele ser muy real, por lo tanto nos quedamos con el **tiempo de llenado de 0,4 segundos**. Resumiendo queda así la aplicación de tiempos según la serie:

Tiempos de llenado para las distintas series	
Serie A	0.7 segundos
Serie B	0.5 segundos
Serie C	0.4 segundos

Tabla 10: Tiempo de llenado definitivo para cada serie

Con estos tiempos se realizará la continuidad de todos los estudios.

5.2. OPTIMIZADO DE LA TEMPERATURA DE MASA.

Para el optimizado de la temperatura hemos puesto los estudios en cuatro situaciones distintas de temperatura, una de ellas la temperatura recomendada por el fabricante, las otras con los valores siguientes; 225 C°, 245C° y 255C°. Recordar que el tiempo de inyección es el obtenido en el apartado anterior y empleado siempre en la misma serie.

En este apartado solo se exponen y comentan los datos obtenidos para la serie A, ya que el comportamiento es muy similar en las otras dos series, no obstante mostramos los valores obtenidos en las tres series.

Serie A 2 mm espesor	Pieza 13A				Pieza 07A				Pieza 01A			
Temperatura de masa (C°)	225	235	245	255	225	235	245	255	225	235	245	255
presión de inyección (Mpa)	12,41	11,58	10,74	10	7,86	7,28	6,76	6,28	7,79	7,22	6,69	6,23
fuerza de cierre de máquina (T)	2,31	2,09	2,11	1,95	1,39	1,35	1,27	1,14	1,36	1,28	1,15	1,11
Temperatura 95%	226,68	236,46	246,26	256,07	225,92	235,74	245,58	255,42	225,89	236,72	245,56	255,41
Tensión de cizalla 95% max	0,12	0,1145	0,1068	0,09	0,11	0,1057	0,09	0,08	0,16	0,15	0,14	0,13
Velocidad de cizalla 95% max	3282	3207	3173	3147	2573	2568	2359	2342	6977	6973	6963	6960
desviación T ³ (C°)	2,27	2,43	2,56	2,7	2,2	2,32	2,45	2,59	2,2	2,35	2,5	2,61
tiempo para t ⁹ expulsión	53,32	54,82	57,07	58,32	52,07	53,57	55,57	57,07	51,57	53,07	55,07	56,57

Tabla 11: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie A.

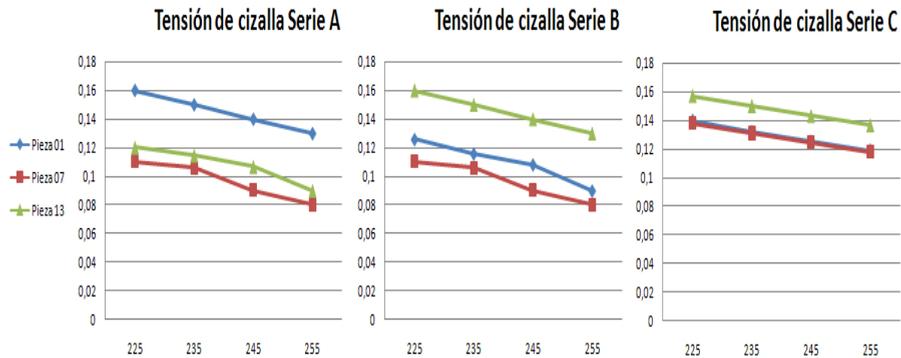
Serie B 1,5 mm espesor	Pieza 01B				Pieza 07B				Pieza 13B			
Temperatura de masa (C°)	225	235	245	255	225	235	245	255	225	235	245	255
presión de inyección (Mpa)	10,58	9,84	9,17	8,57	7,86	7,28	6,76	6,28	7,79	7,22	6,69	6,23
fuerza de cierre de máquina (T)	1,4	1,29	1,19	1,11	1,39	1,35	1,27	1,14	1,36	1,28	1,15	1,11
Temperatura 95%	226,46	236,27	246,09	255,29	225,92	235,74	245,58	255,42	225,89	236,72	245,56	255,41
Tensión de cizalla 95% max	0,126	0,1159	0,1083	0,09	0,11	0,1057	0,09	0,08	0,16	0,15	0,14	0,13
Velocidad de cizalla 95% max	3564	3416	3398	2981	2573	2568	2359	2342	6977	6973	6963	6960
desviación T ³ (C°)	3,05	3,21	3,39	3,54	2,2	2,32	2,45	2,59	2,2	2,35	2,5	2,61
tiempo para t ⁹ expulsión	51,29	53,04	55,04	56,29	52,07	53,57	55,57	57,07	51,57	53,07	55,07	56,57

Tabla 12: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie B

Serie C 1 mm espesor	Pieza 01C				Pieza 07C				Pieza 13C			
Temperatura de masa (C°)	225	235	245	255	225	235	245	255	225	235	245	255
presión de inyección (Mpa)	17,25	16,09	15,2	14,3	17,34	16,33	15,37	14,45	33,01	31,21	29,56	28,02
fuerza de cierre de máquina (T)	2,95	2,77	2,59	2,43	2,96	2,77	2,6	2,44	7,15	6,76	6,41	6,07
Temperatura 95%	227,74	237,51	247,3	257,1	277,73	237,5	247,29	257,1	230,06	239,74	249,44	259,15
Tensión de cizalla 95% max	0,14	0,132	0,1252	0,1188	0,138	0,1309	0,1242	0,1179	0,1569	0,15	0,1431	0,1367
Velocidad de cizalla 95% max	3898	3878	3859	3419	4103	3837	3810	3780	4233	4212	3967	4151
desviación T^3 (C°)	4,17	4,43	4,71	4,95	4,14	4,42	4,68	4,93	3,79	4,12	4,44	4,75
tiempo para t ⁹ expulsión	52,53	54,02	56,28	57,27	51,53	53,28	55,27	56,27	54,03	55,53	58,03	58,53

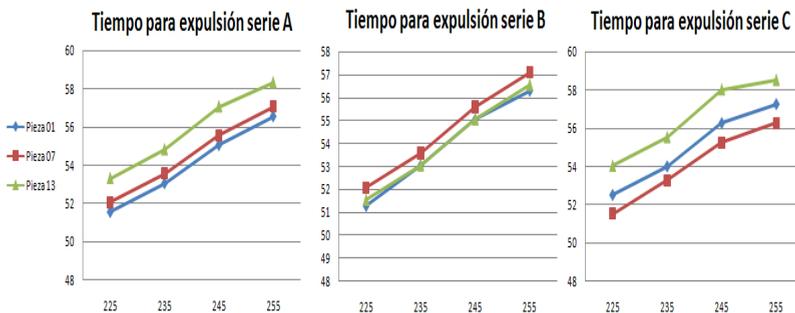
Tabla 13: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie C

Observando las gráficas correspondientes de cada una de las variables y su comportamiento dentro de cada serie se observa lo siguiente:



Gráfica 11: Tensión de cizalla a distintas temperaturas de fundido.

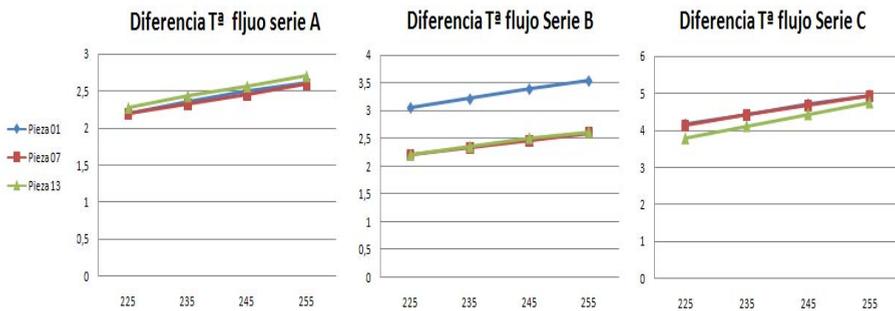
En cuanto a la **tensión de cizalla** (Gráfica 11) para las tres series el comportamiento es el mismo, es decir que mientras aumenta la temperatura de masa, la tensión de cizalla tiende a disminuir, si bien en ningún caso superamos la tensión de cizalla recomendada (0,25 Mpa) lo mejor es escoger siempre valores bajos de tensión de cizalla, por lo tanto en principio y solo observando este parámetro nos decantamos por valores de temperatura de masa altos.



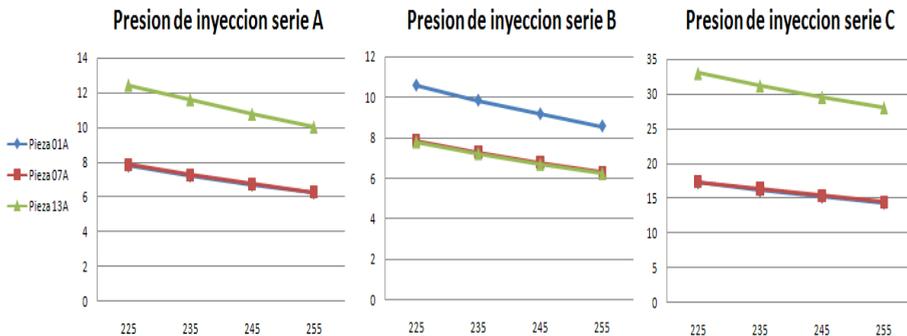
Gráfica 12: Tiempo para expulsión a distintas temperaturas de fundido.

En cuanto al **tiempo necesario para alcanzar la temperatura de expulsión**, (*Gráfica 12*) es obvio que contra más calentemos el material, más nos costará posteriormente enfriarlo, es por ello temperaturas de masa elevadas van acompañadas de tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión más altos, factor clave para la rentabilidad del proceso. Si queremos un proceso rentable iremos a valores bajos de temperatura.

En cuanto a la **diferencia en la temperatura de flujo**, valores de temperatura bajos producen menor diferencia de temperatura en la masa, por ello nos decantamos por valores bajo, ya que este parámetro afectará a las tensiones internas de la pieza (*Gráfica 13*).



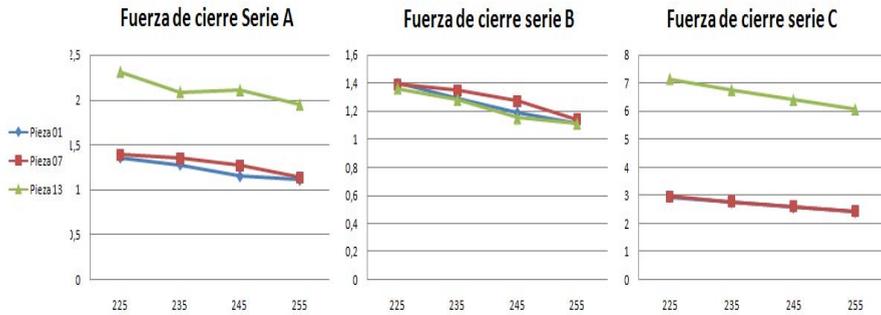
Gráfica 13: Diferencia en la temperatura de flujo para las temperaturas de fundido.



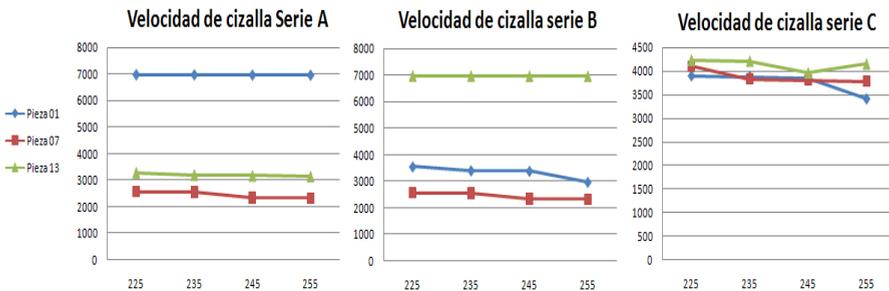
Gráfica 14: Presión de inyección para las temperaturas de fundido

Para la **presión de inyección**, (*Gráfica 14*) en las tres series disminuye si aumentamos la temperatura, en los casos de las piezas extremas, esta variación es más evidente. En este caso nos decantamos por valores altos de temperatura.

La **fuerza de cierre** (*Gráfica 15*) al ser una consecuencia de la presión de inyección, se comporta como ésta, vemos que según aumentamos la temperatura la fuerza necesaria disminuye, situación que es beneficiosa para que la máquina trabaje de forma más relajada, por ello tenderemos a elegir valores más altos.



Gráfica 15: Fuerza de cierre para la temperatura de fundido



Gráfica 16: Velocidad de cizalla para las temperaturas de fundido.

La **velocidad de cizalla** (*Gráfica 16*) permanece más constante que las otras variables, aunque la tendencia sigue siendo más favorable para temperaturas elevadas.

Vemos que hemos de fijar un equilibrio entre criterios de calidad, criterios de costes y criterios de funcionamiento del proceso, es por ello que los valores extremos los descartamos, teniendo presente para nuestra elección los valores de 235 C° y el de 245°.

En el caso de la diferencia entre los valores de cizalla entre la temperatura de 235 C° y 245 C° la diferencia es muy pequeña llegando a 0,01 Mpa. Un dato casi insignificante para estar muy por debajo de la tensión de cizalla recomendada de 0,25 Mpa, con el resto de las variables ocurre más o menos lo mismo, pero sin embargo el tiempo necesario para alcanzar la

temperatura de expulsión es 2,5 sg más bajo en la temperatura de 235 C° con respecto a la temperatura de 245 C°, estamos hablando de probablemente un sobre un 20% menos de ciclo, por este motivo, nos decantamos por una temperatura de 235 C° que corresponde con la temperatura recomendada.

5.3. OPTIMIZADO DE LA PRESIÓN DE COMPACTACIÓN.

Para aplicar una presión de compactación fija en cada una de las series analizaremos inicialmente cual es la presión óptima en las piezas extremo es decir en la piezas 01 y 13 de cada serie. Una vez obtenido el valor de la presión de compactación adecuado y el tiempo de aplicación de dicha presión lo aplicaremos a cada una de las piezas de las distintas series y se observará el comportamiento de las variables resultado. Decir que la explicación del análisis corresponde solo a la serie A, el resto de las series tiene el mismo comportamiento.

Si la presión de compactación es muy baja puede que la presión del material que hay en el interior de la pieza sea superior a la que se está ejerciendo en la compactación, con lo que el material podría salirse de la cavidad, por otro lado una compactación baja puede producir una disminución en el índice de rechupes y agudizar los efectos de los rechupes en la pieza, lo que generaría una calidad de la pieza pobre, lo mismo ocurriría con la contracción volumétrica que en el caso de compactaciones bajas sería más pronunciada que con compactaciones altas.

Si la presión es muy alta se puede sobrecompactar la pieza forzando tensionalmente el molde, y provocando rebabas en la pieza, los valores de presiones de inyección y fuerza de cierre se elevarían con el consiguiente gasto energético y sobretensión de los componentes de máquina y molde, en el caso del tamaño de pieza a estudio, las fuerzas de cierre necesarias no son lo suficientemente grandes como para ocasionar algún peligro mecánico.

Se debe buscar un equilibrio entre ambos aspectos, pero el criterio dominante siempre debe ser la calidad de la pieza baja un bajo coste. Para optimizar la presión de compactación se observan tres aspectos:

1° Caída de presión suave, sin bajadas ni subidas a lo largo de dicha presión. Para ello vamos a comprobar las distintas líneas de presión en la entrada de la pieza y al final de la pieza y eliminar los picos y valles que se puedan eliminar.

2° Que las diferencias entre las presiones máximas en los puntos de la pieza sean lo más similar posible. Para ello analizamos la diferencia que existe entre el valor máximo de la presión y el pico de presión máximo. El pico de presión máximo corresponde a la presión

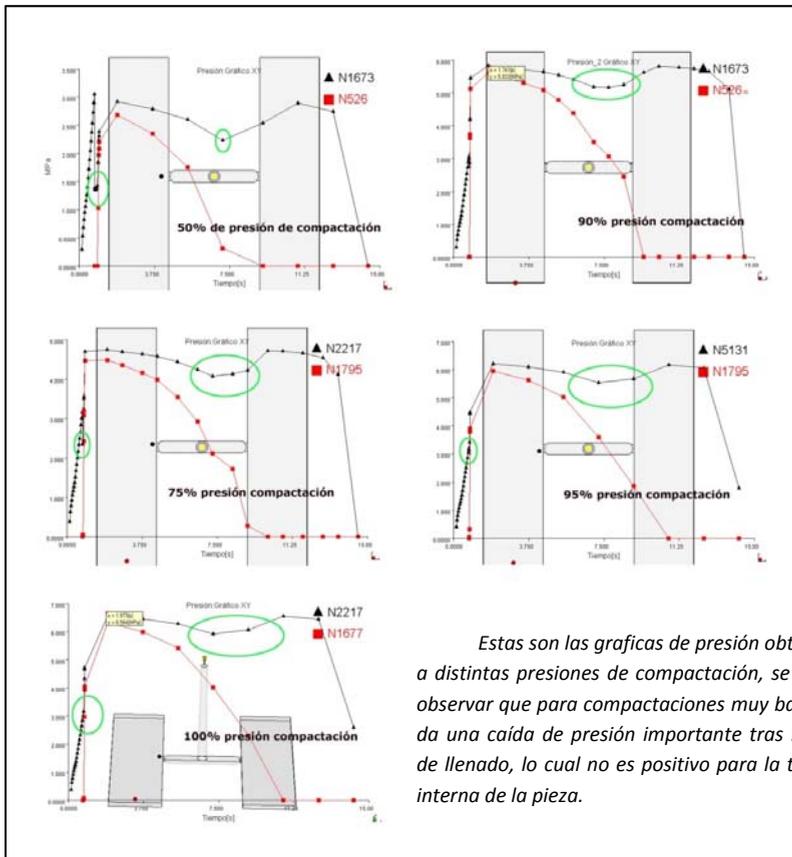
máxima de la curva de presión más baja, generalmente al final del flujo de inyección (extremo de la pieza).

3º Un tiempo de compactación máximo hasta el enfriamiento de la entrada de material.

Para resolver este punto veremos a través de la simulación cual es el momento exacto en el cual la entrada a la pieza queda solidificada, punto a partir del cual, es innecesario aplicar más presión dado que el material no entraría en la pieza al estar la entrada solidificada.

Conclusiones Para 1º la caída de presión suave:

Observando las graficas de abajo (Figura 11) vemos que en presiones de compactación de 50% y 70% tras el llenado se produce una caída de presión importante la cual queda subsanada en el momento en el que aumentamos la presión a 90%



Estas son las graficas de presión obtenidas a distintas presiones de compactación, se puede observar que para compactaciones muy bajas, se da una caída de presión importante tras la fase de llenado, lo cual no es positivo para la tensión interna de la pieza.

Figura 11: Comportamiento de la presión de compactación en la curva de presiones

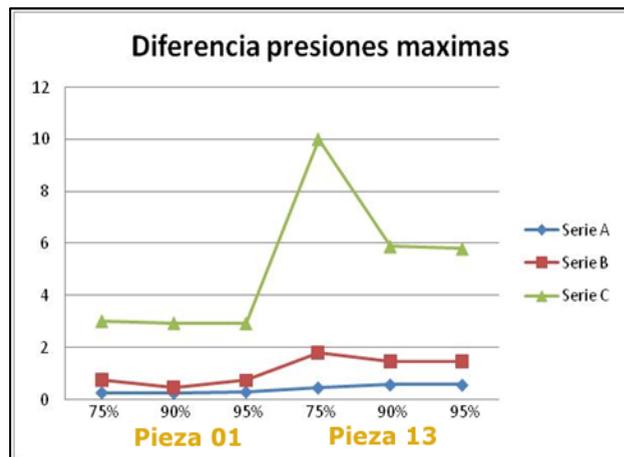
Por lo tanto y en principio este aspecto nos ayuda a decantarnos por presiones de compactación a partir de 90%, por otro lado una caída de presión fuerte como la que se da en las gráficas de 50% y 70% de presión de compactación hacen aumentar el tiempo de llenado.

Conclusiones para el segundo punto de análisis (diferencias de presiones máximas):

Si observamos los datos de las diferencias de presiones máximas y el pico de presión máximo (*Gráfica 17*) de la serie A (pieza 01A), que para una presión de compactación del 75% corresponde a 0,27 Mpa, para una presión de compactación del 90% corresponde a 0,25 Mpa y para la presión de compactación del 95% es de 0.296 Mpa y para la pieza 13A los datos son para una presión de 75% de 0,46 Mpa, para la presión de compactación de 90% es de 0,57 Mpa y para la presión de compactación del 95% es de 0,59 Mpa, estos datos nos empujan a aceptar que la presión de compactación del 95% hemos de descartarla como presión de compactación adecuada, ya que esta diferencia entre la presión máxima y el pico de presión máximo es la más alta en todos los estudios realizados independientemente de la serie analizada. Estos datos nos decantan a emplear presiones que estén entre 75% y 90% de compactación.

Si observamos los datos de las otras series (B y C), la diferencia mínima entre la presión máxima y el pico de presión máximo lo tiene la presión del 90% datos que nos descartan inicialmente a la presión de compactación del 75% ya que lo que estamos buscando es la presión de compactación válida para las tres series.

En la gráfica se puede ver como en la mayoría de las series el valor de la presión del 90% es que tiene una diferencia de presiones máximas inferior al resto.



Gráfica 17: diferencias de presiones máximas para las distintas presiones de compactación.

Otro factor a tener en cuenta será la calidad de la pieza, hecho que analizaremos a través de los valores de contracción volumétrica, y el índice de rechupes (aunque en esta pieza el índice de rechupes no será muy evidente dado que no existen unos cambios de sección importantes).

Para presiones altas de compactación, la fuerza de cierre, la máxima presión en pieza y el pico mínimo crecen, la diferencia entre estas dos últimas variables debe ser la mínima, que se da en el caso de la presión de compactación del 90% como ya hemos dicho antes. Por otro lado disminuyen la contracción volumétrica ligeramente mientras aumentamos la compactación.

Estas mismas consideraciones las haremos para la pieza 13A dentro de esta misma serie, y las mismas piezas para las otras dos series, siendo los resultados los siguientes. Tras hacer el mismo análisis para las otras dos series (B y C) el valor para aceptable para estas series también es el 90% de presión de compactación.

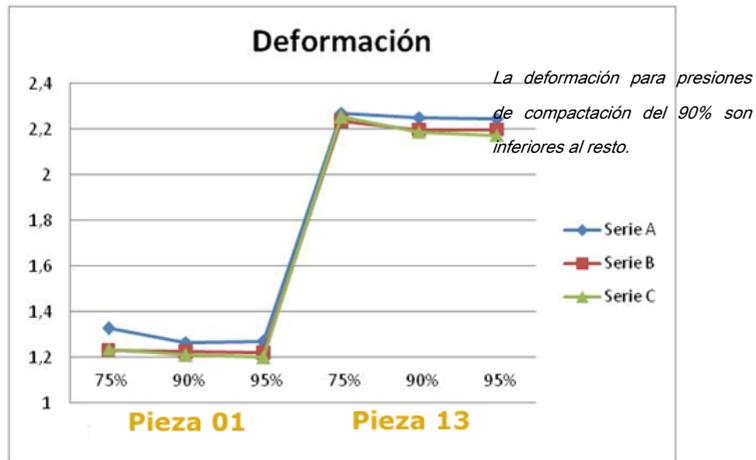
Serie A 2 mm espesor	Pieza 01A			Pieza 13A		
Compactación	75	90	95	75	90	95
máxima presión en pieza	4,72	5,83	6,206	7,83	9,696	10,28
Pico mínimo presión	4,45	5,58	5,91	7,37	9,12	9,71
diferencia	0,27	0,25	0,296	0,46	0,57	0,57
fuerza de cierre	2,49	3,06	3,25	4,1	5,0321	5,34
contracción volumétrica (media)	6,88	6,87	6,84	7,05	6,9	6,85
deformación	1,328	1,267	1,269	2,272	2,253	2,248
Peso pieza tras compactación	9,67	9,67	9,68	9,68	9,7	9,71
Tiempo Solidificación	14,51	14,48	14,23	13,53	13,74	13,74
Tiempo de llenado	0,85	0,8245	0,81	0,8651	0,8313	0,8253
Tiempo compactación	13,66	13,656	13,42	12,665	12,909	12,915

Serie B 1,5 mm espesor	Pieza 01B			Pieza 13B		
Compactación	75	90	95	75	90	95
Máxima presión en pieza	6,881	8,08	8,86	12,77	15,07	15,96
Pico mínimo presión	6,13	7,63	8,13	10,95	13,6	14,48
Diferencia	0,751	0,45	0,73	1,82	1,47	1,48
Fuerza de cierre	3,39	4,1823	4,44	6,12	7,52	7,98
Contracción volumétrica (media)	7,1369	7,0279	7	7,2	6,97	6,92
Deformación	1,23	1,224	1,222	2,236	2,198	2,199
Peso pieza tras compactación	7,57	7,58	7,58	7,55	7,57	7,57
Tiempo de solidificado	10,25	10,24	10,23	10,26	10,25	10,24
Tiempo de llenado	0,589	0,578	0,57	0,6	0,5891	0,58
Tiempo compactación	9,661	9,662	9,66	9,66	9,6609	9,66

Serie C 1 mm espesor	Pieza 01C			Pieza 13C		
	75	90	95	75	90	95
Compactación	75	90	95	75	90	95
Máxima presión en pieza	11,96	14,4	15,22	26,8	27,61	29,18
Pico mínimo presión	8,95	11,46	12,3	16,81	21,74	23,39
Diferencia	3,01	2,94	2,92	9,99	5,87	5,79
Fuerza de cierre	5,54	6,84	7,28	10,72	13,26	14,11
Contracción volumétrica (media)	7,39	7,17	7,09	7,14	6,7	6,59
Deformación	1,238	1,211	1,2	2,254	2,189	2,175
Peso pieza tras Compactación	5,5	5,51	5,51	5,44	5,47	5,47
Tiempo de solidificado	9,52	9,51	9,51	7,03	7,23	7,02
Tiempo de llenado	0,362	0,3563	0,3523	0,37	0,3623	0,3578
Tiempo compactación	9,158	9,1537	9,1577	6,66	6,8677	6,6622

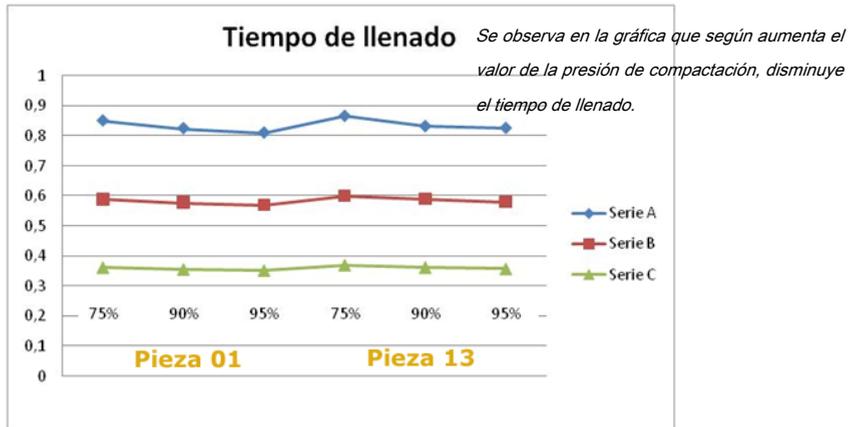
Tabla 14: Variables en fase de compactación para las distintas presiones de compactación

En cuanto a la deformación [Gráfica 18] que se da en la pieza tras la contracción los datos también nos inclinan a utilizar la presión del 90% ya que en todos los casos esta deformación es inferior empleando esta presión de compactación.



Gráfica 18: Deformación con las distintas presiones de compactación.

Otro factor importante para situar la presión de compactación es el **tiempo de llenado** si observamos la gráfica siguiente [Gráfica 19] veremos cómo según aumentamos las presión de compactación, disminuye el tiempo de llenado, a partir de la presión del 90% la bajada es más suave. Por otro lado los tiempos de llenado para la presión del 90% también son sensiblemente más bajos que para la presión de compactación del 75%.



Gráfica 19: Tiempo de llenado para las distintas presiones de compactación.

En cuanto aquellas variables que debieran minimizarse como son la presión de inyección, la fuerza de cierre, decir que si bien son más altas con la presión de compactación del 90% los niveles de calidad que ofrece esta presión son superiores al resto de presiones estudiadas y como tampoco existe una diferencia amplia entre los datos, no los tendremos en cuenta, ya que la prioridad es obtener una pieza de calidad.

A modo resumen en la mayoría de las series, la presión de compactación al 90% es la que tiene mejores valores de diferencia entre la presión máxima en pieza y el pico mínimo de presión. Con esta presión también obtenemos unos valores de contracción volumétrica y de deformación con respecto a la presión de 95% y de 75% mejores. Por estos motivos seleccionamos la presión de 90% para todas las series.

Conclusiones para el tercer punto de análisis (tiempo de compactación).

Referente al tiempo de compactación tenemos la siguiente información gráfica [Figura 12].

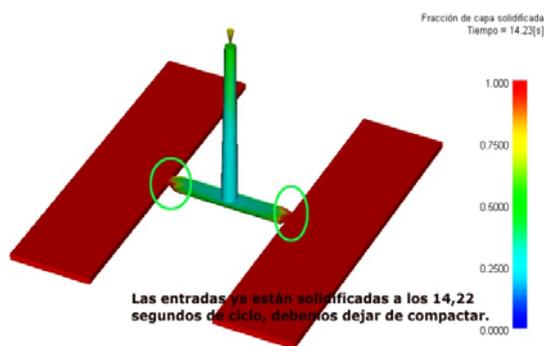


Figura 12: Tiempo de enfriamiento de la entrada de material

Para el optimizado del tiempo de compactación observamos la grafica de "Fracción de capa solidificada" [Figura 12] y retrocedemos el cursor del reproductor de la simulación hasta que la entrada esté roja, esto nos indicará que la entrada está solidificada, no podremos meter más material y será el tiempo que indica la simulación el tiempo a partir del cual dejaremos de compactar, ya que no tiene sentido intentar meter más material si la entrada a la pieza está solida.

También se puede observar que como la pieza ya está completamente solidificada justo antes de que solidifique la entrada el tiempo de enfriamiento de la piezas será el mínimo ya que se puede extraer perfectamente tras la fase de compactación, esto podemos verlo con Figura 13, que nos indica la temperatura de masa tras la compactación. En base a esto el tiempo de enfriamiento a aplicar será mínimo y pondremos 1 segundo.

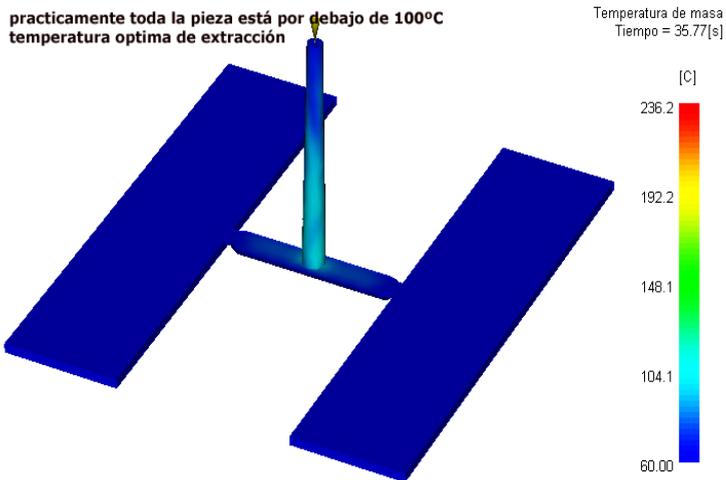
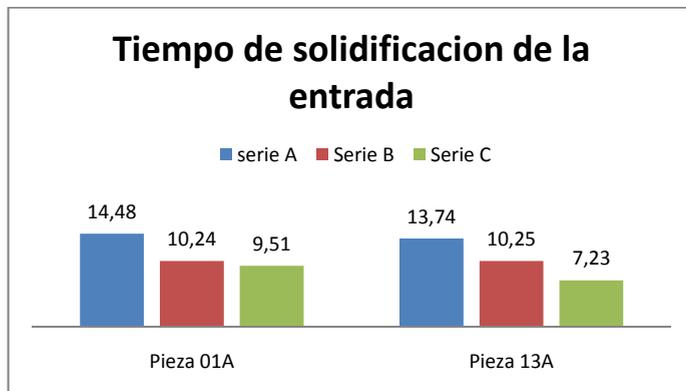


Figura 13: Tiempo para alcanzar la temperatura de extracción.

El tiempo de compactación que aplicaremos al programa será el tiempo de solidificación de la entrada menos el tiempo de llenado, que en la mayoría de los casos estamos sobre 0,85 segundos. Por lo tanto el tiempo de compactación será de:

$$Tiempo\ de\ compactación = T_{solidi} - T_{llenado} = 15 - 0.85 = 14.15\ sg$$

Una vez realizado el mismo análisis para las otras series y con respecto al tiempo de solidificación de las entradas, vemos que existe diferencia entre las distintas series y dentro de las distintas series varía según la relación A/B.



Gráfica 20: Tiempo de solidificación de la entrada para cada serie

Según baja el espesor necesitamos menos tiempo para que se enfríe la pieza, y por consiguiente podemos aplicar menos tiempo de presión de compactación, también se da que según aumentamos la relación A/B, también necesitamos menos tiempo de solidificación.

Dadas estas diferencias de tiempo de compactación, lo que haremos será aplicar en cada serie el máximo de los tiempos obtenidos en cada una de las piezas para cada serie quedando de la siguiente forma:

- **Serie A 2 mm:** tiempo de compactación 13,66sg
- **Serie B 1,5 mm:** 9.66sg
- **Serie C 1 mm:** 9.1sg

En cuanto al tiempo de enfriamiento en todas las series emplearemos 1 segundo, y como presión de compactación para todos los estudios emplearemos 90%.

A modo resumen tras esta etapa de optimizado de variables de entrada incluimos en la tabla los datos que emplearemos en cada una de las series.

	Tiempo llenado (sg)	Temperatura de masa (C°)	Tiempo de compactación (sg)
Serie A	0.7	235	13.66
Serie B	0.5	235	9.66
Serie C	0.4	235	9.1

Tabla 15: Datos definitivos de llenado y compactación

RESULTADOS

6. Resultados

6.1. VALORES OBTENIDOS TRAS EL ESTUDIO DE LLENADO

Para no tener una saturación de datos obtenidos y así poderlos analizar mejor, vamos a dividir estos datos en dos partes, una será los resultados obtenidos tras el estudio de llenado, y la otra parte de estudio será como afecta las variables de entrada en el estudio de la compactación.

Los resultados obtenidos son el fruto de realizar estos 2 estudios (estudio de llenado y de compactación) en las 13 piezas de cada serie, en total 78 estudios distintos.

Veremos de qué forma varia cada una de las variables resultado definidas en el apartado 4.1. con la relación A/B y con el espesor de las piezas. Los valores obtenidos son:

	Pieza 01 A	Pieza 02 A	Pieza 03 A	Pieza 04 A	Pieza 05 A	Pieza 06 A	Pieza 07 A	Pieza 08 A	Pieza 09 A	Pieza 10 A	Pieza 11 A	Pieza 12 A	Pieza 13 A
presión de inyección (Mpa)	7,22	6,61	6,75	8,53	6,85	7,1062	7,28	7,57	8,82	9,74	10,83	11,15	11,54
fuerza de cierre de máquina (T)	1,28	1,45	0,71	1,79	1,0986	0,67	1,35	0,84	1,14	1,41	1,69	1,76	2,09
Temperatura 95%	235,72	235,36	235,64	235,94	235,66	235,66	235,74	235,76	235,99	236,14	236,37	236,4	236,46
Tensión de cizalla 95% (stress) máxima	0,15	0,1	0,11	0,1068	0,1028	0,1094	0,1057	0,1073	0,1098	0,1029	0,1024	0,1163	0,1145
Velocidad de cizalla 95% (rate) máximo	6973	2402	3116	2626	2419	2798	2568	2738	2868	2411	2374	3341	3207
desviación T° del frente de avance (C°)	2,35	2,2	2,26	2,2035	2,24	2,42	2,32	2,49	2,45	2,5	2,5	2,49	2,43
Tiempo T ² de expulsión pieza	10,36	11,71	10,42	10,36	10,36	10,34	10,45	10,13	10,18	10,39	10,47	10,47	10,66
Tiempo T ³ de expulsión	53,07	61,09	53,32	53,07	53,07	53,05	53,57	51,8	52,05	53,31	53,81	53,81	54,82

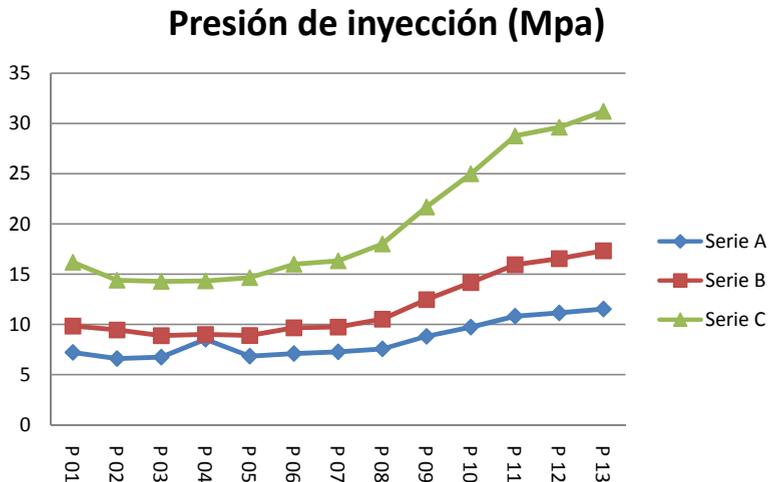
	Pieza 01 B	Pieza 02 B	Pieza 03 B	Pieza 04 B	Pieza 05 B	Pieza 06 B	Pieza 07 B	Pieza 08 B	Pieza 09 B	Pieza 10 B	Pieza 11 B	Pieza 12 B	Pieza 13 B
presión de inyección (Mpa)	9,84	9,45	8,88	9	8,9	9,67	9,74	10,52	12,47	14,17	15,94	16,54	17,33
fuerza de cierre de máquina (T)	1,29	2,0772	1,8963	1,1381	1,61	2,06	1,28	2,35	2,04	2,5	2,96	3,08	3,29
Temperatura 95%	236,27	236,19	236,102	236,1128	236,12	236,23	236,24	236,39	236,72	236,96	237,27	237,39	237,53
Tensión de cizalla 95% (stress) máxima	0,1159	0,1083	0,1079	0,1213	0,1076	0,1089	0,1076	0,1182	0,1101	0,1034	0,1119	0,1144	0,1079
Velocidad de cizalla 95% (rate) máximo	3416	2879	2863	3934	2776	2951	2864	3633	2991	2691	3071	3148	2913
desviación T° del frente de avance (C°)	3,21	3,08	2,9762	3,08	3,0489	3,1067	3,23	3,13	3,23	3,24	3,21	3,19	3,18
Tiempo T ² expulsión pieza	6,06	6,02	6,1	6,13	6,4	6,02	6,12	6,035	6,14	6,16	6,19	6,16	6,27
Tiempo T ³ expulsión serie B	53,04	52,08	53,31	53,8	57,05	52,31	53,79	52,56	54,04	54,29	54,55	54,29	55,54

	Pieza 01 C	Pieza 02 C	Pieza 03 C	Pieza 04 C	Pieza 05 C	Pieza 06 C	Pieza 07 C	Pieza 08 C	Pieza 09 C	Pieza 10 C	Pieza 11 C	Pieza 12 C	Pieza 13 C
presión de inyección (Mpa)	16,19	14,4	14,29	14,34	14,65	16	16,33	18,01	21,69	24,99	28,76	29,62	31,21
fuerza de cierre de máquina (T)	2,77	3,35	2,82	2,5	2,44	3,2	2,77	3,24	4,28	5,18	6,14	6,35	6,76
Temperatura 95%	237,51	237,19	237,19	237,2	237,25	237,47	237,5	237,79	238,37	238,87	239,39	239,52	239,74
Tensión de cizalla 95% (stress) máxima	0,132	0,127	0,1244	0,1257	0,1314	0,13	0,1309	0,1334	0,138	0,1424	0,1468	0,1481	0,1498
Velocidad de cizalla 95% (rate) máximo	3878	3666	3369	3174	5171	3328	3837	3190	3709	3540	4250	3720	4212
desviación T° del frente de avance (C°)	4,43	4,2	4,22	4,33	4,37	4,3	4,42	4,42	4,39	4,34	4,25	4,23	4,12
Tiempo T ² expulsión pieza serie C	3,95	3,96	3,91	3,77	3,71	3,73	3,68	3,7	3,74	3,77	4,02	4,02	4,016
Tiempo de expulsión serie C	54,02	54,04	52,79	55,29	53,78	54,28	53,28	53,78	54,78	55,53	55,53	55,53	55,53

Tabla 16: Resultados obtenidos en el fase de Llenado

A continuación analizamos gráficamente y de forma independiente cada una de las variables enfrentando las 3 series.

6.1.1. PRESIÓN DE INYECCIÓN:



Grafica 21: Presión de inyección en la fase de llenado

El comportamiento general en las tres series es una ascensión de la presión de inyección según vamos aumentando la relación A/B, si bien pretendemos ir hacia una presión de inyección mínima no nos interesa tener relaciones de inyección superior a 1 dado que es a partir de aquí donde la presión empieza a subir con más fuerza.

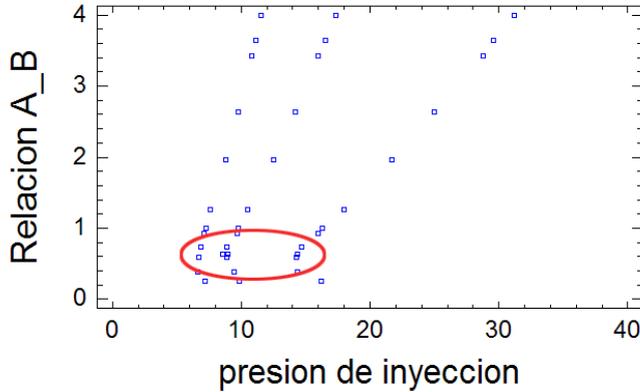
Vemos que las piezas P02, P03, P04, P05 son las que tienen menores presiones de inyección, exceptuando la pieza P04 de la serie A que no se mantiene esta tendencia.

En cuanto a la comparativa entre series, se observa que según disminuimos el espesor, la presión de inyección tiende a aumentar, siendo la serie C de 1 mm de espesor la que tiene valores más elevados.

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas **donde la relación A/B es inferior a 1 y espesores de pieza elevados.***

Si observamos el gráfico de dispersión siguiente observamos que las presiones más bajas dentro de cada serie siempre corresponden a valores bajos de relación A/B.

Gráfico de Relación A_B frente a presión de inyección



Gráfica 22: Gráfico de dispersión de la presión de inyección

Observemos de qué manera afectan estas variables independientes en un gráfico en 3D a la variable dependiente de la presión de inyección.

Superficie de Respuesta "Presión de Inyección"

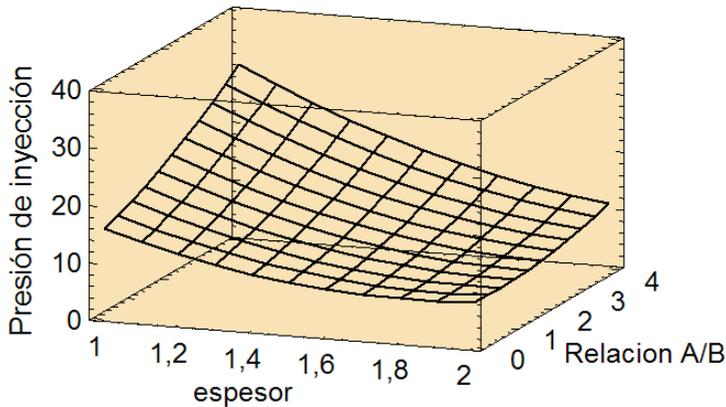


Figura 14: Superficie respuesta de la presión de inyección

Se puede observar como al aumentar el espesor disminuye la presión, y que disminuye al disminuir la relación A/B. En el gráfico siguiente se observa que peso tienen cada una de las variables dependientes sobre la variabilidad de la presión de inyección, mostrando claramente que es el espesor el aspecto que hace variar la presión de inyección.

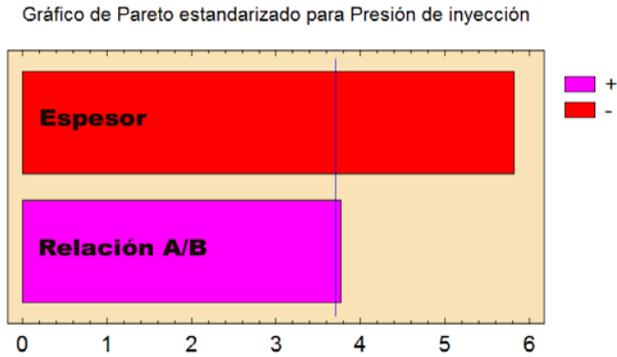
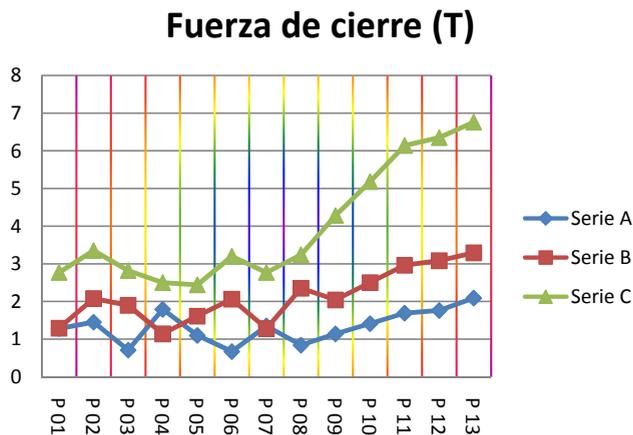


Figura 15: Pareto de influencia en la presión de inyección

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Presión\ de\ inyección = 45,87 - 41,47 \cdot E + 5,28 \cdot R + 11,23 \cdot E^2 - 2,85 \cdot E \cdot R + 0,32 \cdot R^2$$

6.1.2. FUERZA DE CIERRE.



Gráfica 23: Fuerza de cierre para la fase de llenado

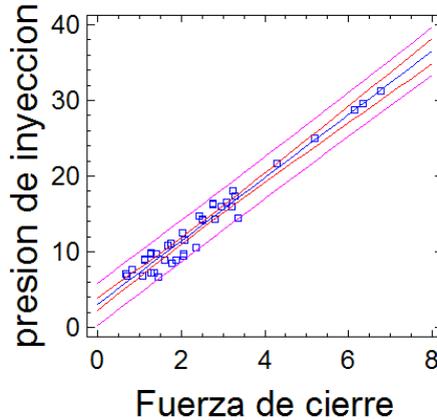
El comportamiento de la fuerza de cierre es similar al de la inyección ya que ambas variables está relacionadas esto se puede ver a través del siguiente análisis de dependencia obtenido a través con Statgraphics.

El coeficiente de correlación obtenido es de 0,979 lo que indica una relación relativamente fuerte entra las dos variables (fuerza de cierre y presión de inyección).

La relación lineal obtenida es:

$$\text{Presión de inyección} = 3,03 + 4,18 \cdot \text{fuerza de cierre}$$

Gráfico del Modelo Ajustado



Gráfica 24: Gráfico de dispersión presión de inyección y fuerza de cierre.

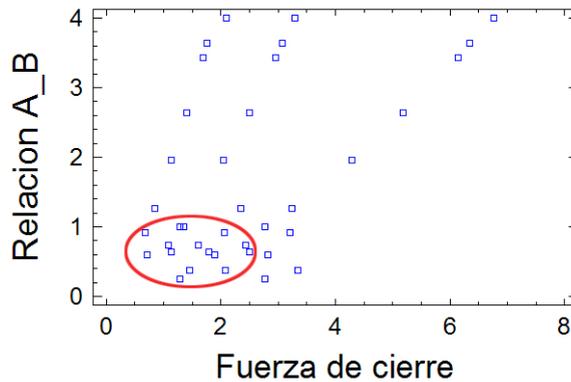
Volviendo al gráfico inicial de la fuerza de cierre podemos ver que la fuerza de cierre necesaria aumenta cuando la relación A/B es superior a 1, teniendo los valores más bajos en las tres series en las piezas 02, 03, 04, 05.

Si comparamos las tres series, también observamos el mismo comportamiento que con la presión de inyección, es decir a menores espesores mayores fuerzas de cierre, esto inclina a pensar que:

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas **donde la relación A/B es inferior a 1 y espesores de pieza elevados.***

Si observamos el gráfico de dispersión siguiente observamos que las presiones más bajas dentro de cada serie siempre corresponden a valores bajos de relación A/B.

Gráfico de Relacion A_B frente a Fuerza de cierre



Gráfica 25: Gráfico de correlación lineal de la fuerza de cierre.

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la fuerza de cierre.

Superficie de Respuesta "Fuerza de cierre"

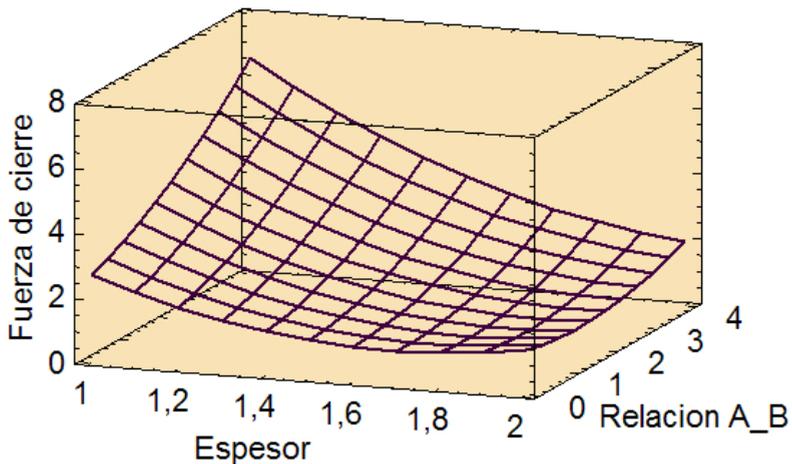


Figura 16: Superficie respuesta de la fuerza de cierre.

Se puede observar como al aumentar el espesor disminuye la fuerza de cierre, y que disminuye al disminuir la relación A/B. En el gráfico siguiente se observa que peso tienen cada una de las variables dependientes sobre la variabilidad de la Fuerza de cierre. También es el espesor el factor que más influye sobre la fuerza de cierre.

Gráfico de Pareto estandarizado para Fuerza de cierre

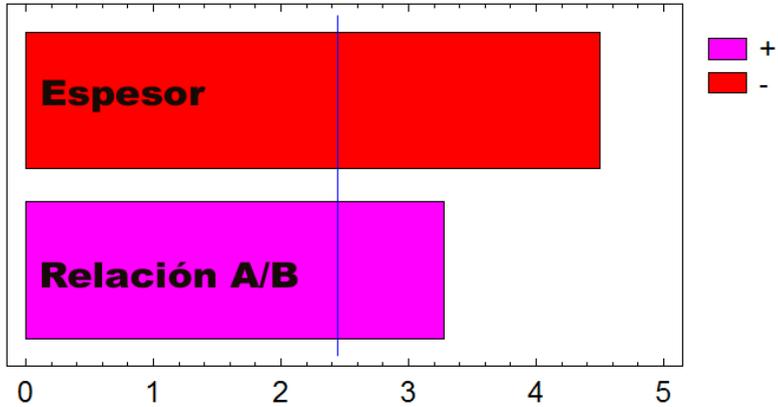


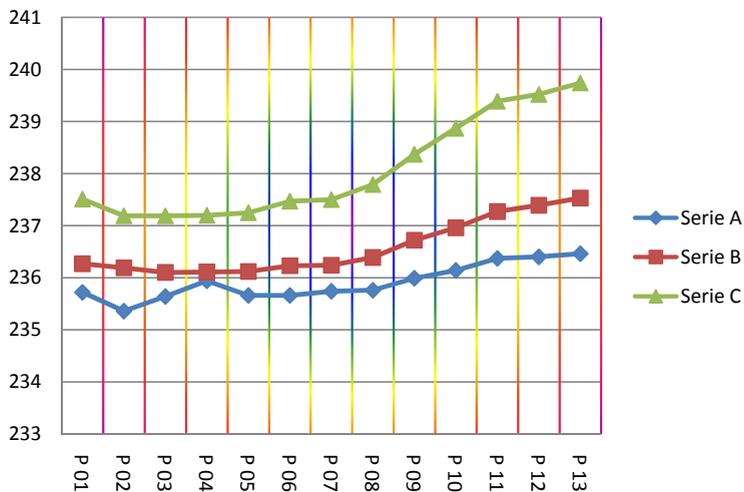
Figura 17: Pareto de influencia de la fuerza de cierre.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{fuerza de cierre} = 10,65 - 11,299 \cdot E + 1,33 \cdot R + 3,22 \cdot E^2 - 0,82 \cdot E \cdot R + 0,117 \cdot R^2$$

6.1.3. TEMPERATURA 95 %

Temperatura 95 %

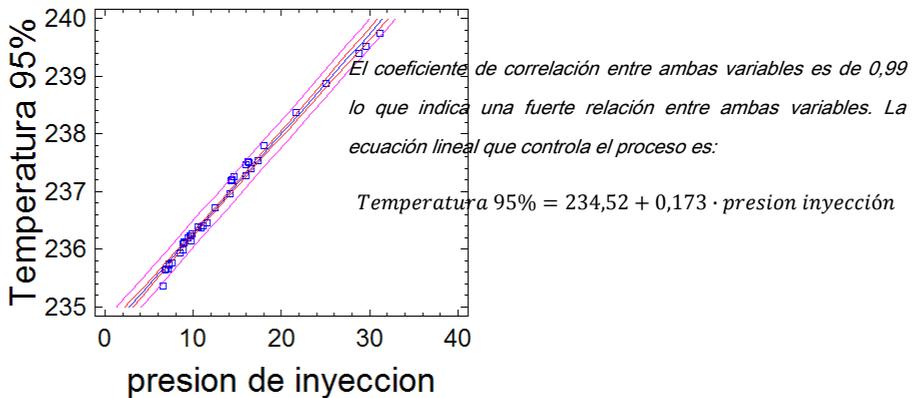


Gráfica 26: Temperatura del 95% del flujo en la fase de llenado.

En cuanto a la temperatura de masa que obtenemos justo tras llenar la cavidad se observa que se desarrolla de forma similar a las variables anteriores, es decir según aumentamos la relación A/B el material dentro del molde está más caliente, esto supondrá aumentar las condiciones de refrigeración o bien aumentar tiempos de enfriamiento, por ello también hemos de dirigirnos a una configuración que ofrezca una minimización de la temperatura de flujo.

Veamos de qué forma se relaciona la temperatura de flujo con la presión de inyección a través de un análisis de regresión lineal:

Gráfico del Modelo Ajustado



Gráfica 27: Gráfico de correlación lineal de la temperatura 95%

Contra menor es la relación A/B menores son las temperaturas de flujo, se observa que a partir de la pieza 07, las temperaturas ascienden de forma más evidente, la diferencia de temperaturas que se dan dentro de la serie C es de 2,55 C°, en la serie B es de 1,43 C°, y en la serie A es de 1,1C°, esto nos indica que a mayor espesor, menor es el salto térmico dentro de todas sus configuraciones.

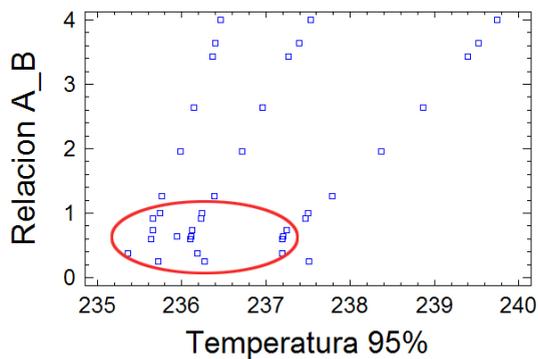
En este caso y dada la relación existente entre estas variables también las piezas 02, 03, 04, 05 son las que minimizan el valor de la temperatura.

Dentro de la comparativa entre series, es la serie con mayor espesor (serie A 2 mm) la que ofrece valores más positivos. Por lo tanto:

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas **donde la relación A/B es inferior a 1 y espesores de pieza elevados.***

Si observamos el gráfico de dispersión siguiente observamos que los valores de temperatura 95% más bajas dentro de cada serie siempre corresponden a valores bajos de relación A/B.

Gráfico de Relación A_B frente a Temperatura 95%



Gráfica 28: Dispersión para la variable de la Temperatura al 95%.

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un gráfico en 3D a la variable independiente de la temperatura de flujo.

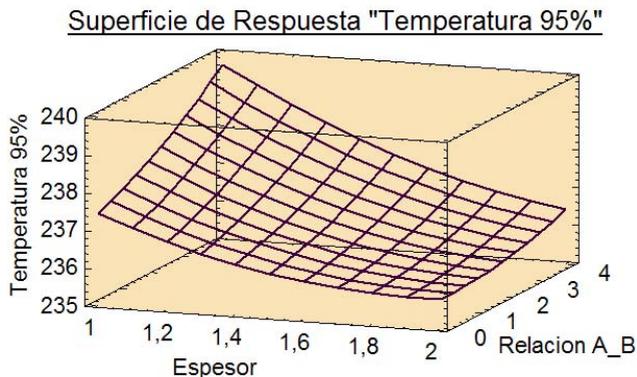


Figura 18: Superficie respuesta de la Temperatura al 95%.

Se puede observar como al aumentar el espesor disminuye la Temperatura, y que disminuye al disminuir la relación A/B. En el gráfico siguiente se observa que peso tienen cada una de las variables dependientes sobre la variabilidad de la Temperatura en el flujo. De nuevo es el espesor el factor que más influye sobre la temperatura al 95%.

Gráfico de Pareto estandarizado para Temperatura 95%

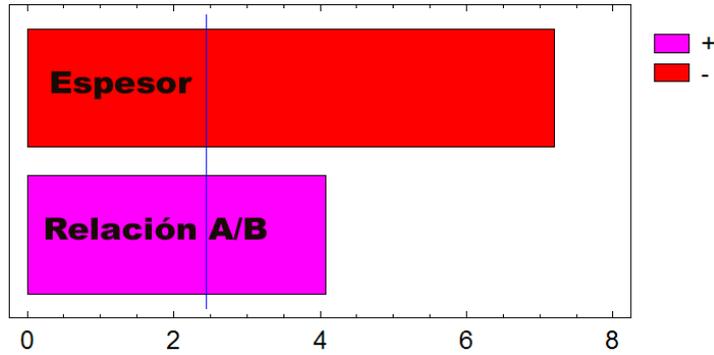


Figura 19: Pareto de influencia para la temperatura 95%.

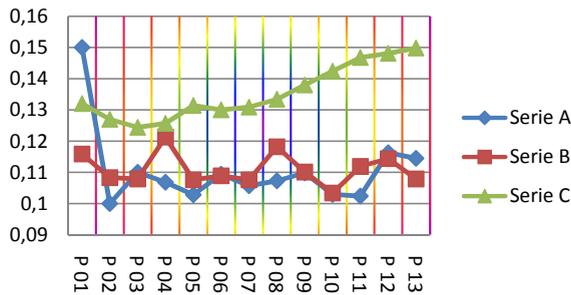
La ecuación del modelo ajustado es:

$$Temperatura\ 95\% = 245,91 - 13,80 \cdot E + 2,36 \cdot R + 4,5 \cdot E^2 - 0,39 \cdot E \cdot R - 0,32 \cdot R^2$$

6.1.4. TENSIÓN DE CIZALLA.

En ninguno de los casos se supera el límite de tensión de cizalla que tiene el material, que recordemos que era de 0,25 Mpa.

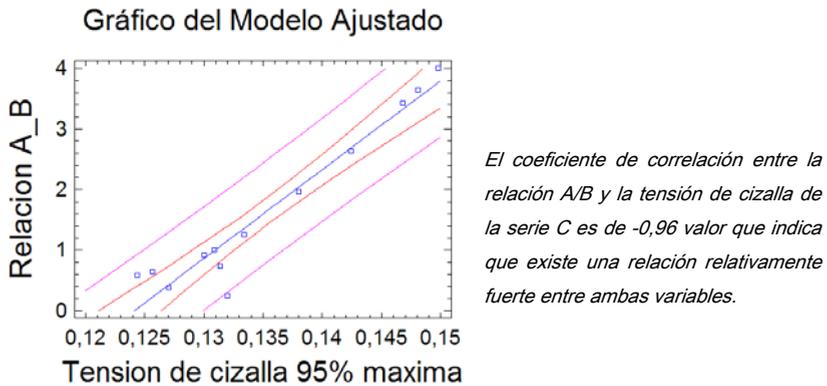
Tensión de cizalla



Gráfica 29: Tensión de cizalla para la fase de llenado.

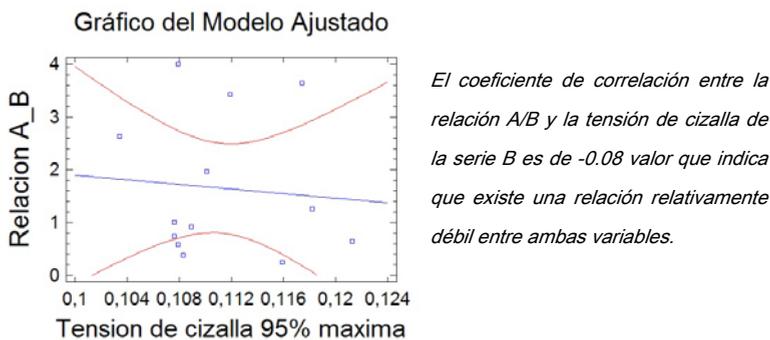
En la pieza 1 de la serie A tiene una tensión de cizalla elevada con respecto a los otros estudios de la misma serie, es un punto atípico y aparentemente no mantiene ninguna relación con el resto de los puntos. Fuera de esta observación, podemos ver que si bien en la serie C (1 mm) no representa un comportamiento inestable con relación a la relación A/B, es decir que se puede realizar una predicción de cuál sería el siguiente valor ya que se observa una tendencia al alza, las otras dos series sí que se comportan de forma inestable a lo largo de las piezas.

En la **serie C** las piezas 02, 03, 04 son las menor tensión de cizalla tienen, y además muestra claramente que según aumentamos la relación A/B la tensión de cizalla aumenta, esto se constata a través del coeficiente de correlación que para este caso es de 0.96 lo que indica una relación fuerte entre ambas variables en esta serie.



Gráfica 30: Correlación de tensión de cizalla para la serie C

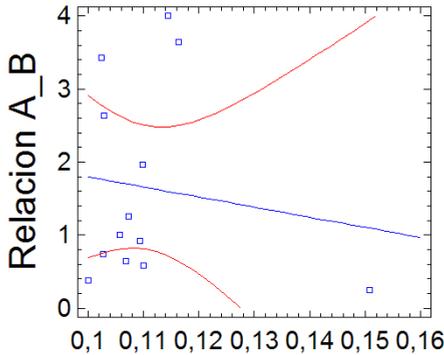
En la **serie B**, se produce un comportamiento de zigzag, sin aparente relación con la relación A/B, hay que añadir que no existe una diferencia elevada entre todos los valores véase el coeficiente de correlación de la gráfica.



Gráfica 31: Correlación Lineal para la tensión de cizalla en la serie B.

En la **serie A**, también se produce un comportamiento de valles y crestas (zigzag) pero es más suave que la serie B, obtenemos valores bajos de tensión de cizalla con valores de relación A/B tanto altos como bajos. Se observa en la grafica que el coeficiente de correlación es muy bajo.

Gráfico del Modelo Ajustado



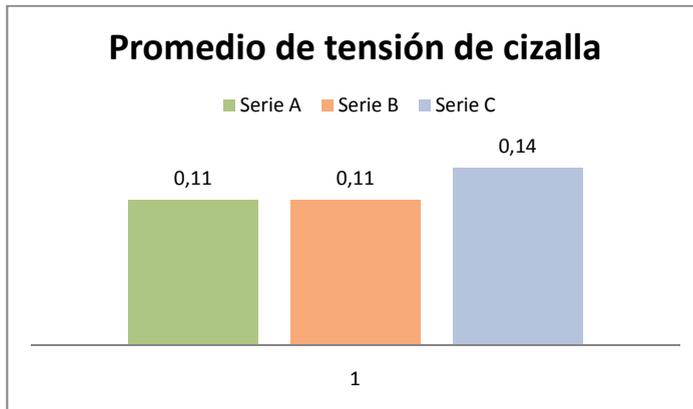
*El coeficiente de correlación entre ambas variables dentro de la serie A es de **-0,208**, lo que indica una relación relativa débil entre las dos variables.*

Tension de cizalla 95% maxima

Gráfica 32: Correlación lineal de la tensión de cizalla para la serie A

En definitiva, el comportamiento de esta variable adquiere comportamientos diferentes según la serie a analizar.

Observando los valores tenemos los siguientes promedios para cada una de las series:



Gráfica 33: Medias de la tensión de cizalla por serie.

Como se comentó inicialmente el valor correspondiente a la pieza 01 de la serie A, eleva el valor promedio de la serie, eliminando este valor el valor promedio quedaría en 0,1 Mpa. Esto ayuda a pensar que según disminuimos el espesor, aumenta la tensión de cizalla.

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza elevados para reducir la tensión de cizalla. Si debemos emplear espesores bajos deberíamos decantarnos por configuraciones donde la relación A/B es menor a 1.***

La desviación estándar obtenida en las series es la siguiente:

Serie A	Serie B	Serie C
0.004	0.005	0.008

Tabla 17: Desviación estándar de la tensión de cizalla en cada serie.

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un gráfico en 3D a la variable independiente de la tensión de cizalla.

Superficie de Respuesta estimada

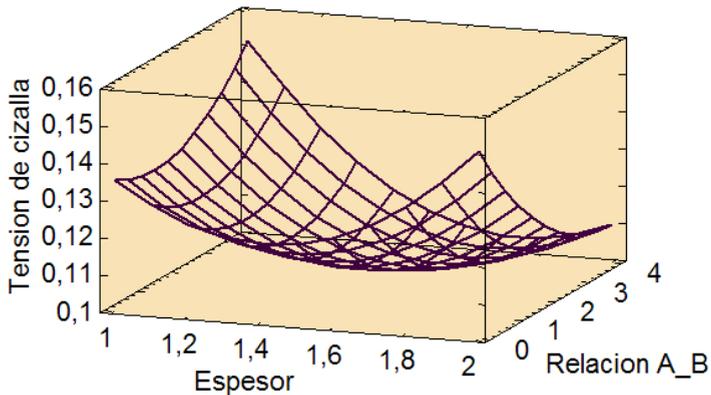
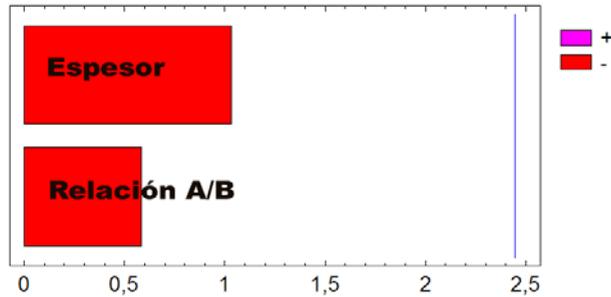


Figura 20: Superficie respuesta para la tensión de cizalla.

En este caso el comportamiento no es tan lineal como los casos anteriores, y vemos como varía de forma distinta los valores de la tensión de cizalla dentro de las distintas series los distintos valores de la relación A/B, de hecho si se revisan los coeficientes de correlación de las distintas series, se puede comprobar que el comportamiento es muy distinto según la serie de espesores que cojamos. El peso de las variables dependientes sobre la variable de la tensión de cizalla es el siguiente:

Gráfico de Pareto estandarizado para Tensión de cizalla



Gráfica 34: Pareto de influencia en la tensión de cizalla.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$tensión\ de\ cizalla = 0,28 - 0,23 \cdot E + 0,008 \cdot R + 0,08 \cdot E^2 - 0,014 \cdot E \cdot R - 0,002 \cdot R^2$$

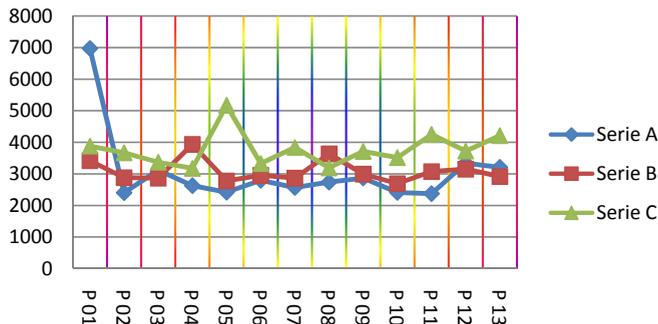
Es de nuevo el espesor el factor que más altera la variable dependiente.

6.1.5. VELOCIDAD DE CIZALLA

En ninguno de los casos se supera el valor permitido por el fabricante del material referido a la velocidad de cizalla que corresponde a 100.000 1/s.

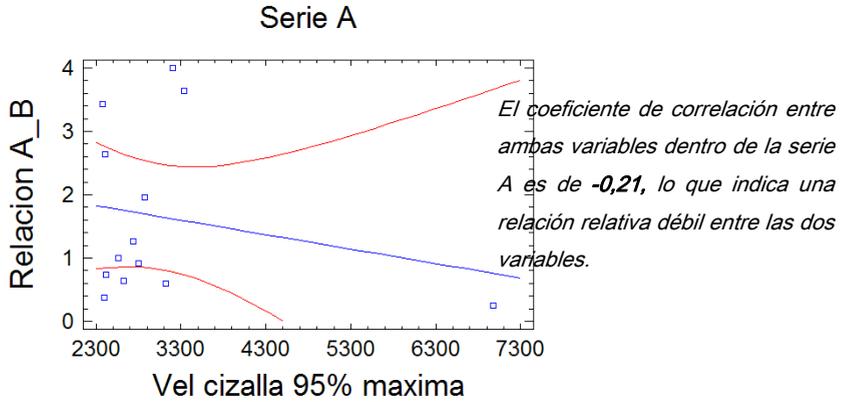
Comentar inicialmente que existen dos datos que salen de los comportamientos aparentemente normales, uno de ellos es el punto correspondiente a la pieza 01 de la serie A y el otro es el correspondiente a la pieza 05 de la serie C, estos puntos por ser datos extraños los eliminamos del promedio.

Velocidad de cizalla 1/s

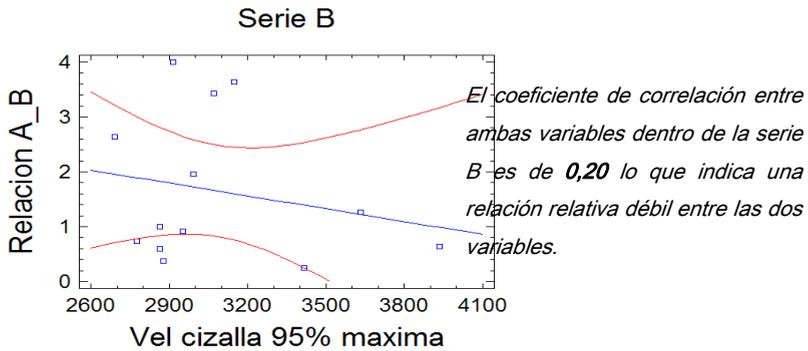


Gráfica 35: Velocidad de cizalla en la fase de llenado.

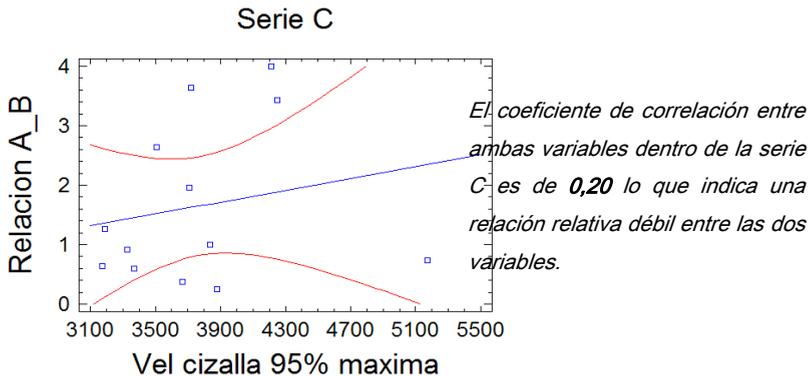
En las tres series los datos se comporta de forma inestable obteniendo subidas y bajadas, aparentemente no muestra relación con la variable de la relación A/B observemos su coeficientes de correlación.



Gráfica 36: Coeficiente de correlación de la velocidad de cizalla para la serie A



Gráfica 37: Coeficiente de correlación de la Velocidad de cizalla para la Serie B



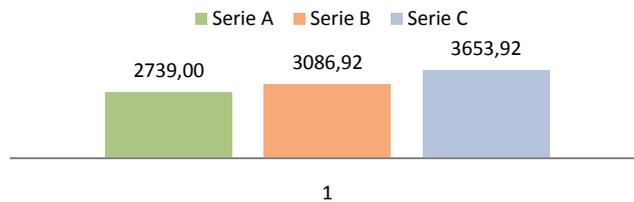
Gráfica 38: Coeficiente de correlación para la velocidad de cizalla para la serie C

Tras analizar la dependencia entre estas variables con la regresión lineal se observa que en ninguna de las series existe relación lineal.

Concluiremos este apartado analizando la relación de la velocidad de cizalla con el espesor, lo haremos a través de la diferencia de los promedios y de la desviación estándar dentro de las tres series.

Tanto en los promedios como en la desviación estándar, excluirémos los datos anormales como son el punto de la pieza 01 de la serie A y el punto de la pieza 05 serie C.

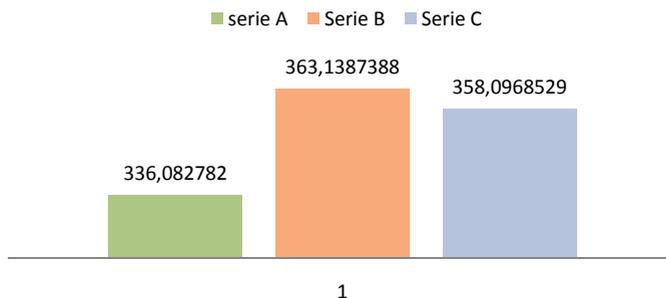
Promedios de la velocidad de cizalla



Gráfica 39: Promedios por serie de la velocidad de cizalla.

Al igual que ocurría con la tensión de cizalla se puede ver que los valores medios de la velocidad de cizalla aumentan al disminuir el espesor.

Desviación estándar de la velocidad de cizalla



Gráfica 40: Desviación estándar para la velocidad de cizalla.

En el gráfico de barras donde se muestra la desviación estándar de los distintos valores tomadas para cada serie, observamos que la variabilidad de la velocidad de cizalla es menor en la serie A. Si bien este no es un dato concluyente, podemos decir que con espesores más grandes, la velocidad de cizalla permanece más estable dentro de las variaciones de la relación A/B.

Según los datos obtenidos tenemos que:

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza elevados para reducirla velocidad de cizalla. Por otro lado no existe relación aparente entre la velocidad de cizalla y la relación A/B.***

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la velocidad de cizalla.

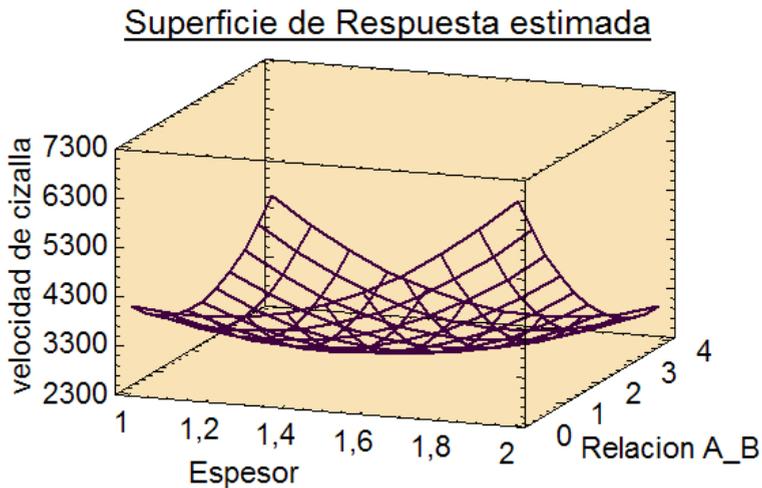
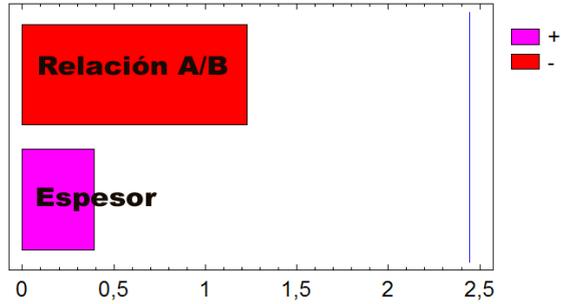


Figura 21. Superficie respuesta de la velocidad de cizalla.

El comportamiento es muy variable a lo largo de los recorridos de espesores y relación A/B, hace un efecto cúpula donde los valores mínimos corresponden a los valores intermedios de los recorridos. La influencia de las variables dependientes sobre la velocidad de cizalla es:

Gráfico de Pareto estandarizado para velocidad de cizalla



Gráfica 41: Pareto de influencia de la velocidad de cizalla.

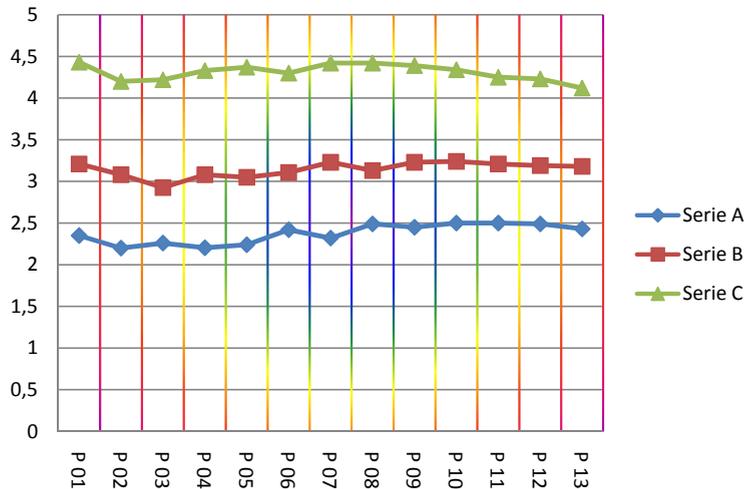
Si bien influye más la relación A/B, ninguna de las variables tienen una influencia elevada sobre la variable de la velocidad de cizalla.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Velocidad de cizalla} = 9613,43 - 9674,33 \cdot E + 189,5 \cdot R + 4138 \cdot E^2 - 1093,3 \cdot E \cdot R + 259 \cdot R^2$$

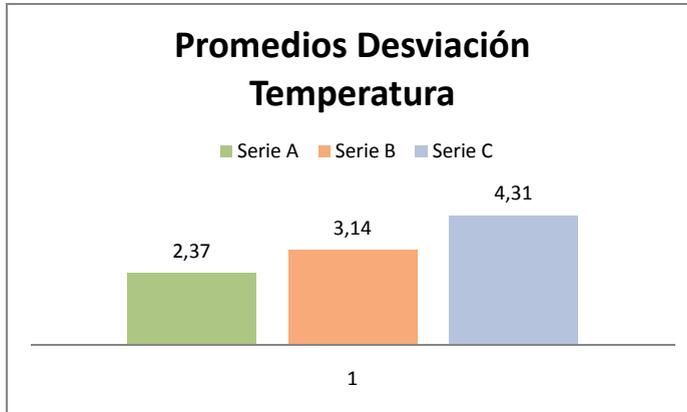
6.1.6. DESVIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MASA TRAS EL LLENADO.

Diferencia de temperatura en la masa



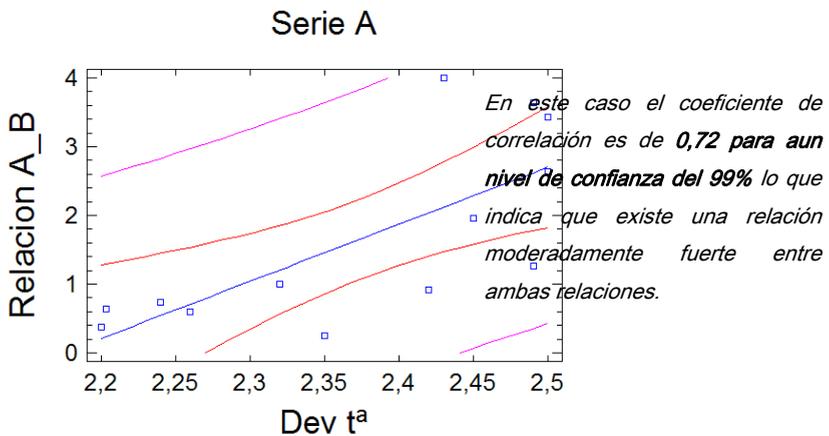
Gráfica 42: Diferencia de temperatura en masa tras el llenado

A priori se observa fácilmente que según disminuimos el espesor de las piezas la diferencia de temperatura en la masa tras el llenado aumenta, esta diferencia debe tender al mínimo para evitar problemas de deformación posteriormente. Esta circunstancia se observa mejor con el grafico de barras de abajo donde se aprecia los valores promedios.

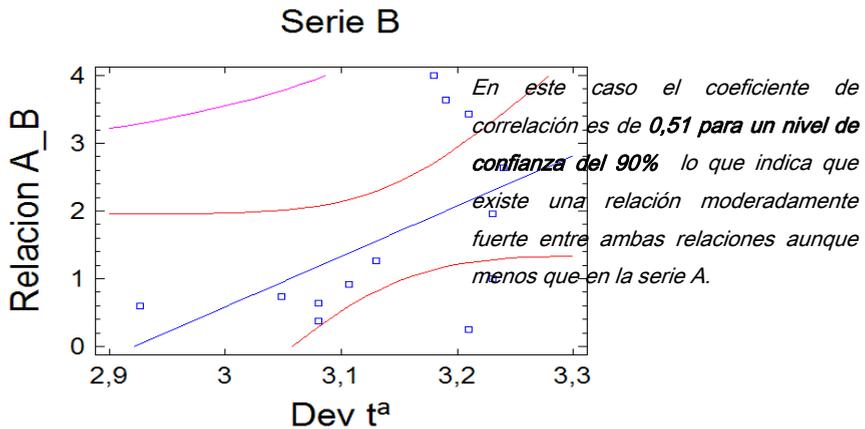


Gráfica 43: Promedios de temperatura en masa.

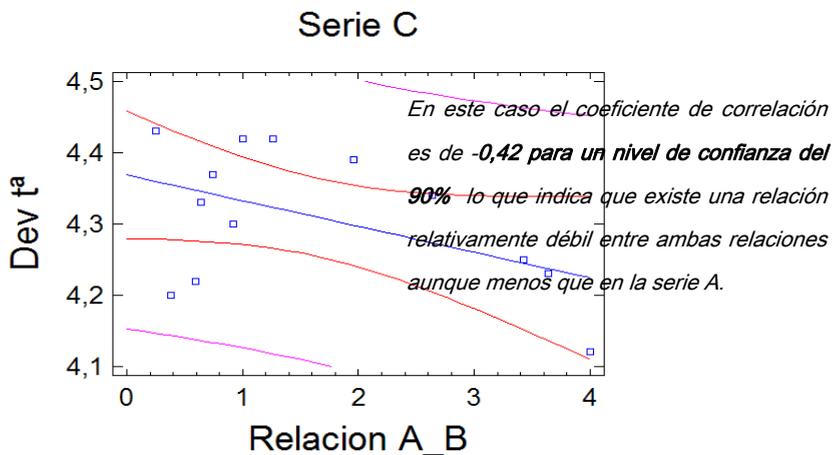
En cuanto a la relación entre la diferencia de temperatura en masa tras el llenado y la relación A/B ésta no es tan evidente, de momento observamos que dicha relación afecta de forma distinta a las distintas series, veamos a través del coeficiente de correlación de qué manera se relacionan estas variables.



Gráfica 44: Coeficiente de correlación de la temperatura en masa serie A.



Gráfica 45: Coeficiente de correlación de la diferencia de la temperatura en masa serie B



Gráfica 46: Coeficiente de correlación de la diferencia en la temperatura en masa de la serie C

Por lo tanto, para concluir, podemos decir que existe cierta relación positiva entre la relación A/B para las series A y B. mientras que para la serie C, la relación es menor, pero además es negativa, es decir que la diferencia de temperatura disminuye según aumentamos la relación A/B. en base a esto tenemos:

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza elevados** para reducirla la diferencia de temperaturas. Por otro lado no existe relación fuerte entre la desviación de la temperatura y la relación A/B.*

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la Desviación de la temperatura en el flujo.

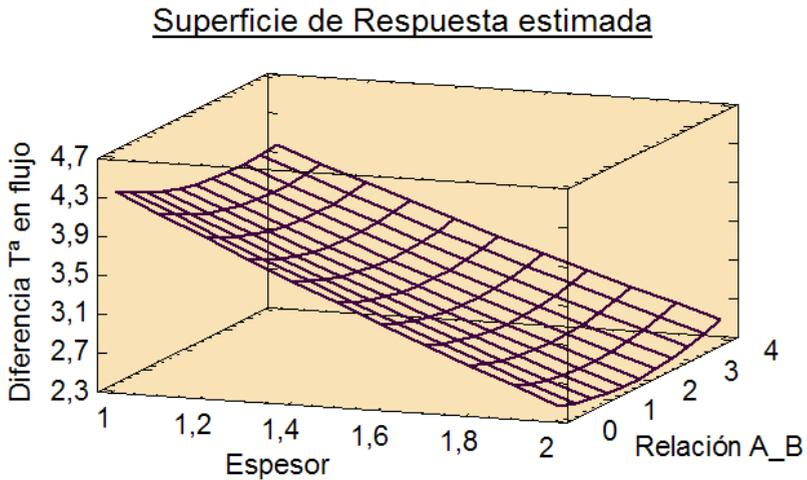
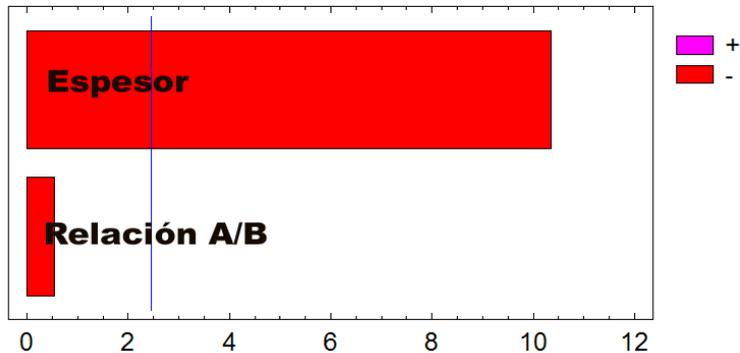


Figura 22: Superficie respuesta de la diferencia en la temperatura en la masa

Se observa claramente que la dependencia de la desviación de la temperatura en el flujo es más evidente cuando aumentamos el espesor, variando mínimamente al modificar la relación A/B. esto se observa más claramente en la gráfica inferior.

Gráfico de Pareto estandarizado para Diferencia Tª en flujo



Gráfica 47: Pareto de influencia en la diferencia de la temperatura en la masa

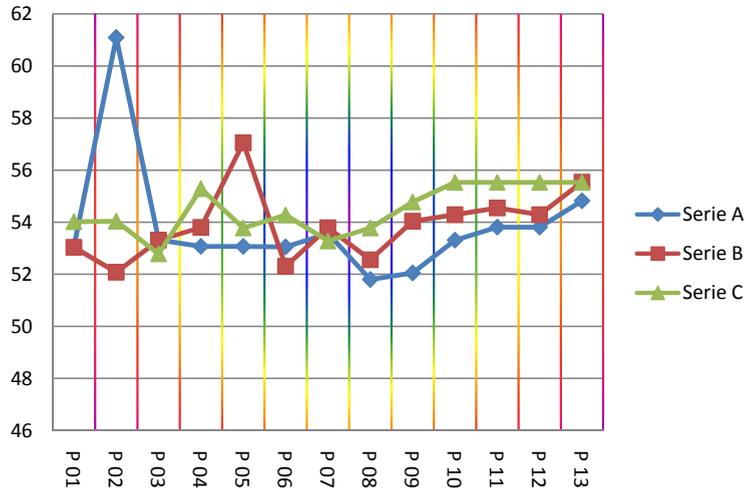
La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Desviacion } T^{\circ} = 7,79 - 3,98 \cdot E - 0,09 \cdot R + 0,62 \cdot E^2 + 0,104 \cdot E \cdot R - 0,019 \cdot R^2$$

La influencia del espesor sobre la diferencia de temperatura en el flujo es muy alta.

6.1.7. TIEMPO NECESARIO PARA LA EXPULSIÓN

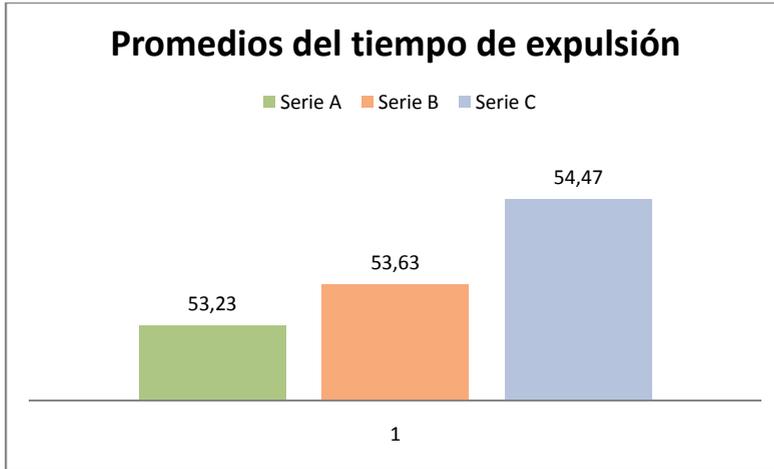
Tiempo para expulsión



Gráfica 48: Tiempo para la expulsión de la pieza en la fase de llenado

Si bien esta variable no aporta de forma definitiva la calidad ni la rentabilidad del proceso, nos podemos hacer una idea de cuál será el comportamiento de la pieza frente al enfriamiento, teniendo en cuenta que no existe sistema de refrigeración. Los tiempos que aquí se exponen corresponden al volumen completo de la pieza, si bien la pieza queda completamente solidificada y preparada para la expulsión a los 15 segundos, el bebedero requiere de más tiempo para la expulsión.

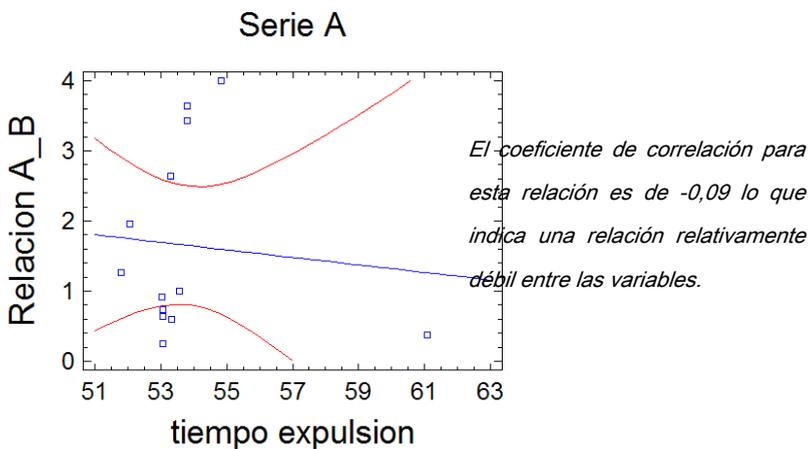
Aquí tenemos otros puntos que se salen del rango habitual de valores, estos son el punto de la pieza 02 serie A y el punto de la pieza 05 de la serie B, los cuales no tendremos en cuenta en los promedios representados abajo en el grafico de barras.



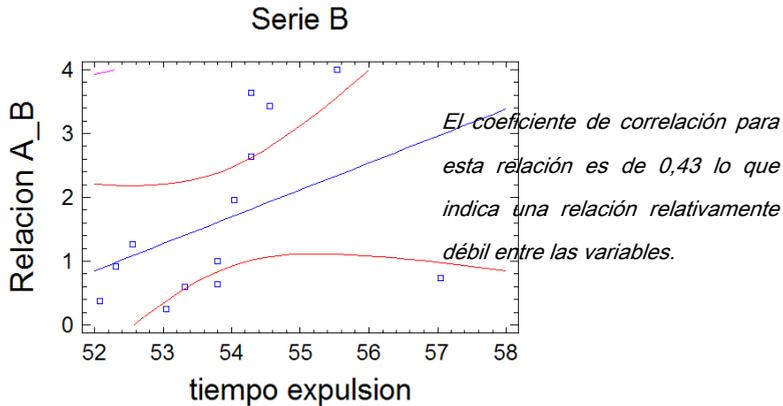
Gráfica 49: Promedios del tiempo de expulsión de la pieza para las tres series

Con esto podemos sentenciar este apartado diciendo que para espesores más elevados, el tiempo para la expulsión se reduce, mientras que para espesores más bajos, este tiempo aumenta.

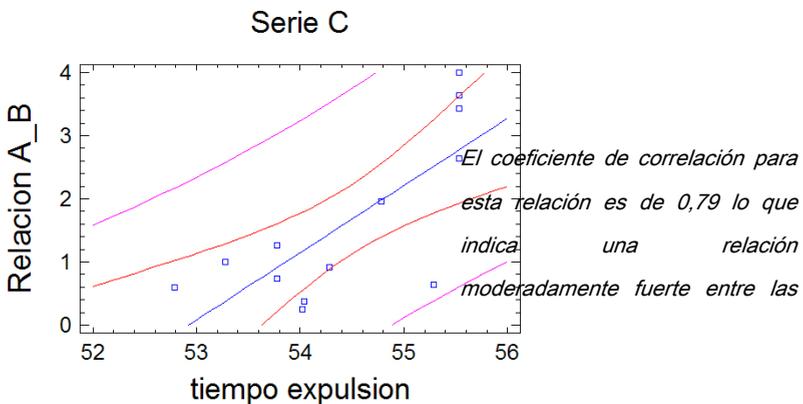
En cuanto a la relación existente entre esta variable y la relación A/B, podemos decir que visualmente, observando la grafica, existe una tendencia a subir el tiempo de expulsión según aumenta la relación A/B, esta tendencia se ve más evidente para relaciones A/B superiores a 1, mientras que para espesores inferiores a 1 esta relación se pierde, tomando valores más independientes. Veamos a través de la regresión lineal el coeficiente de correlación de las distintas series.



Gráfica 50: Coeficiente de correlación del tiempo de expulsión de la pieza en la serie A.



Gráfica 51: Coeficiente de correlación para el tiempo de expulsión de la pieza en la serie B.



Gráfica 52: Coeficiente de correlación del tiempo de expulsión de la pieza en la serie C

Los gráficos anteriores de regresión lineal aportan información en cuanto a la relación de la variable del tiempo necesario para la expulsión con respecto a la relación A/B, constatando lo dicho anteriormente de que la relación entre estas variables es baja, pero que por otro lado la relación es distinta según el espesor de la pieza, aumentando la relación según aumentamos el espesor.

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza elevados** para reducir el tiempo de expulsión. Por otro lado no existe relación fuerte entre el tiempo de expulsión y la relación A/B.*

Hay que aclarar, que este tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, incluye el tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión del bebedero que es la parte de la pieza que es la que marca las diferencias definitivas entre las distintas series, si eliminamos esta parte de la pieza es evidente que a menor masa para enfriar, menor será el tiempo requerido para llegar a una temperatura concreta. De hecho se puede ver en las imágenes siguientes [Figura 23] que es la pieza con menor espesor (serie C) la que tarda menos en enfriarse (tarda menos en llegar a la temperatura de expulsión).

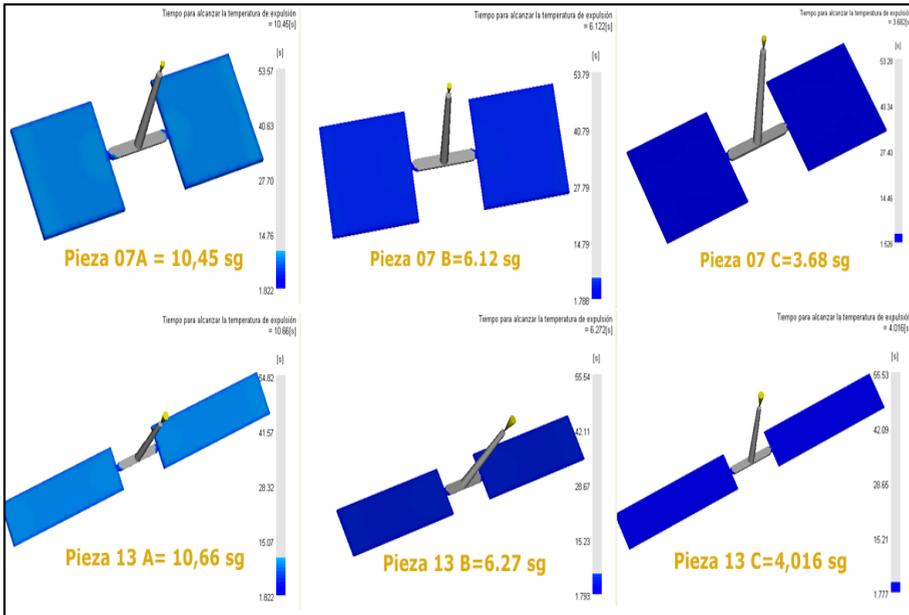
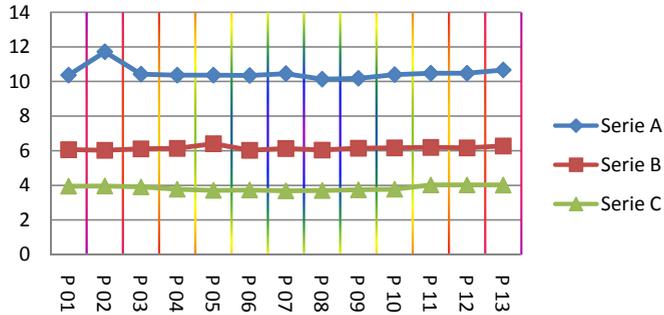


Figura 23: Tiempo de expulsión de las piezas sin el bebedero

Los datos obtenidos para este tiempo de expulsión de la pieza se reflejan en el gráfico siguiente:

Tiempo para expulsión de la pieza



Gráfica 53: Tiempo de expulsión para la pieza

Lo que indica claramente que si aumentamos el espesor de la pieza obtendremos ciclos más largos, siempre y cuando no tengamos en cuenta el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de expulsión del bebedero. Esto sugiere que para cada tipo de configuración de las piezas debiéramos crearnos un bebedero adecuado a la propia configuración, asunto que se sale del alcance de este estudio.

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente del tiempo necesario para la expulsión de la pieza.

Superficie de Respuesta estimada

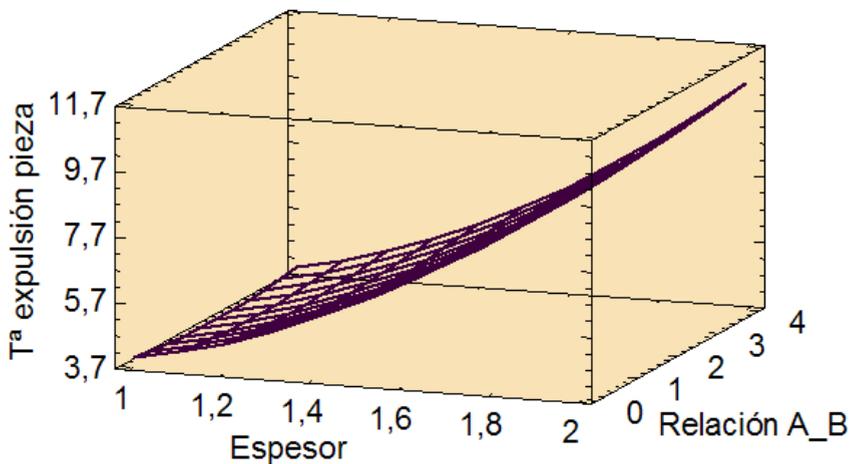
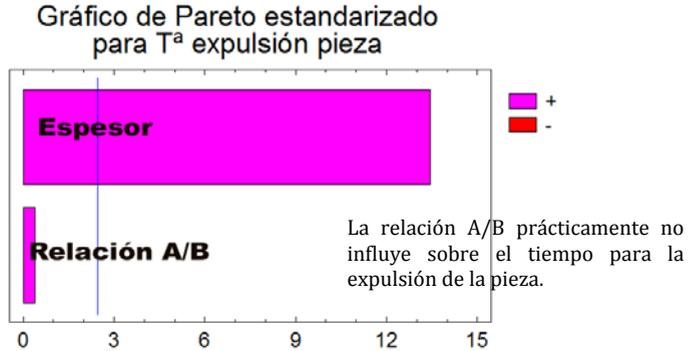


Figura 24: Superficie respuesta para el tiempo de expulsión de la pieza.

Se observa claramente que la dependencia del *tiempo para la expulsión de la pieza* es más evidente cuando aumentamos el espesor tendiendo al alza el tiempo para expulsión de la pieza, mientras que variando la relación A/B prácticamente no se modifica el *tiempo para la expulsión*. En la grafica de Pareto siguiente vemos de qué manera afectan las variables dependientes.



Gráfica 54: Pareto de influencia para el tiempo de expulsión de la pieza

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Tiempo para expulsión} = 5,57 - 5,56 \cdot E - 0,28 \cdot R + 3,97 \cdot E^2 + 0,06 \cdot E \cdot R - 0,056 \cdot R^2$$

6.2. VALORES OBTENIDOS TRAS EL ESTUDIO DE COMPACTACIÓN.

Hemos visto en párrafos anteriores de qué forma afectan las variables dimensionales y el espesor de una pieza a las condiciones de molde en la fase de llenado, en este apartado veremos de qué forma afectarán a las condiciones de la fase de compactación, para ello describiremos variable por variable en qué modo son afectadas las condiciones de salida en la compactación al ir modificando la relación A/B y el espesor de la pieza. Las variables a considerar son las siguientes:

Máxima presión en la pieza.
Pico máximo de presión
Diferencia entre Máxima presión y pico máximo de presión.
Fuerza de cierre en la compactación.
Deformación
Contracción volumétrica.

Tabla 18: Variables a considerar en la fase de compactación

	Pieza 01 A	Pieza 02 A	Pieza 03 A	Pieza 04 A	Pieza 05 A	Pieza 06 A	Pieza 07 A	Pieza 08 A	Pieza 09 A	Pieza 10 A	Pieza 11 A	Pieza 12 A	Pieza 13 A
Serie A 2 mm espesor													
maxima presión en pieza	5,875	5,341	5,41	6,88	5,526	5,73	5,88	6,182	7,22	8,123	9,076	9,4	9,74
Pico mínimo presión	5,62	5,1095	5,22	6,73	5,32	5,49	5,67	5,92	6,91	7,72	8,61	8,87	9,18
diferencia	0,255	0,2315	0,19	0,15	0,206	0,24	0,21	0,262	0,31	0,403	0,466	0,53	0,56
fuerza de cierre	3,0677	2,79	2,84	3,68	2,9	3,01	3,09	3,24	3,79	4,22	4,71	4,84	5,03
contracción volumétrica (media)	6,97	7,03	7,026	6,96	7,03	7	7,0103	7,01	7	6,97	7,02	7,01	6,99
deformación	1,228	1,25	1,25	1,294	1,283	1,37	1,556	1,469	1,697	1,885	2,178	2,136	2,285
Serie B 1.5 mm espesor													
maxima presión en pieza	8,41	8,1	7,6	7,6	7,62	8,28	8,34	9,08	10,84	12,33	13,87	14,48	15,15
Pico mínimo presión	7,54	7,125	6,79	6,83	6,83	7,37	7,5	8,065	9,67	10,98	12,35	12,81	13,42
diferencia	0,87	0,975	0,81	0,77	0,79	0,91	0,84	1,015	1,17	1,35	1,52	1,67	1,73
fuerza de cierre	4,18	4	3,75	3,78	3,78	4,11	4,15	4,51	5,38	6,14	6,92	7,18	7,52
contracción volumétrica (media)	7,52	7,52	7,53	7,54	7,62	7,56	7,6	7,56	7,5	7,48	7,49	7,44	7,46
deformación	1,239	1,212	1,22	1,253	1,311	1,382	1,42	1,493	1,748	1,881	2,073	2,16	2,291
Serie C 1 mm espesor													
maxima presión en pieza	14,4	12,79	12,67	12,69	13,02	14,15	14,48	16,09	19,31	22,3	25,67	26,48	27,84
Pico mínimo presión	12,29	10,82	10,79	10,806	11,09	12,11	12,4	13,66	16,49	18,95	21,71	22,34	23,48
diferencia	2,11	1,97	1,88	1,884	1,93	2,04	2,08	2,43	2,82	3,35	3,96	4,14	4,36
fuerza de cierre	6,84	6,03	5,984	5,99	6,16	6,74	6,89	7,63	9,22	10,64	12,23	12,6	13,26
contracción volumétrica (media)	8,06	8,08	8,02	8,05	8,12	8,036	8,035	8,036	8,01	7,96	7,846	7,86	7,81
deformación	1,204	1,22	1,296	1,293	1,273	1,377	1,376	1,492	1,806	2,183	2,079	2,232	2,243

Tabla 19: Resultados obtenidos en la fase de Compactación

6.2.1. Diferencia entre máxima presión y pico máximo de presión

Se mide el gradiente de la presión en la pieza en el punto justo al lado de la entrada del material y se toma el valor más alto de este gradiente, el gradiente de presión se observa perfectamente en la figura inferior [Figura 25] donde se aprecia que disminuye la presión según el punto se aleja de la entrada es decir hacia la distancia máxima del flujo de masa fundida.

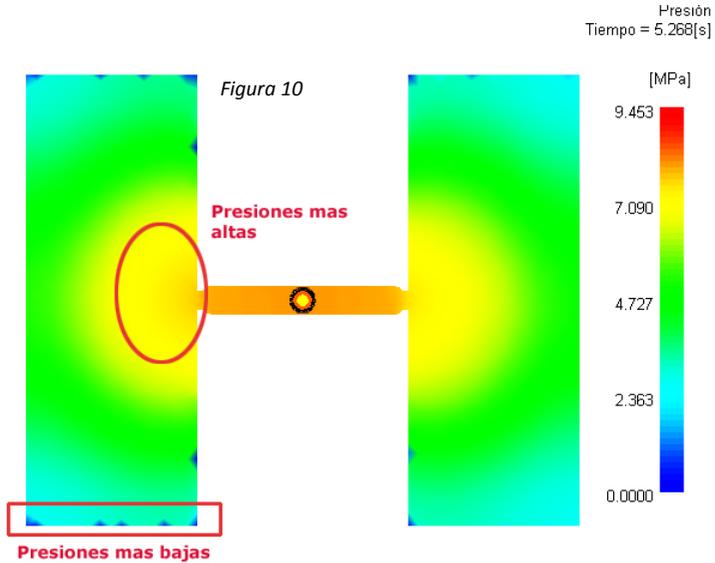


Figura 25: Localización de la máxima presión y el pico máximo de presión

Para obtener las distintas presiones que se dan en un punto de la pieza a lo largo de todo el proceso utilizamos un gráfico X-Y [Figura 26] obtenido desde el programa MoldFlow, a continuación se puede ver como varían las presiones en el punto final de la pieza, lugar donde se da el **pico máximo de presión** y en el punto inicial de la pieza, punto donde corresponde la **máxima presión** que se da en la pieza, lo importante es observar la diferencia entre ambas presiones, ya que para reducir las tensiones en la pieza es necesario que este valor tienda al mínimo.

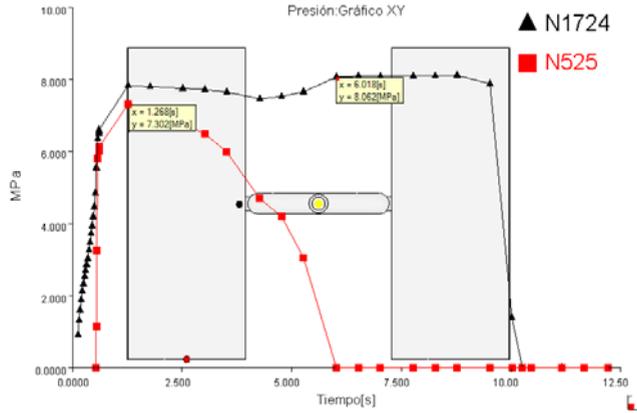
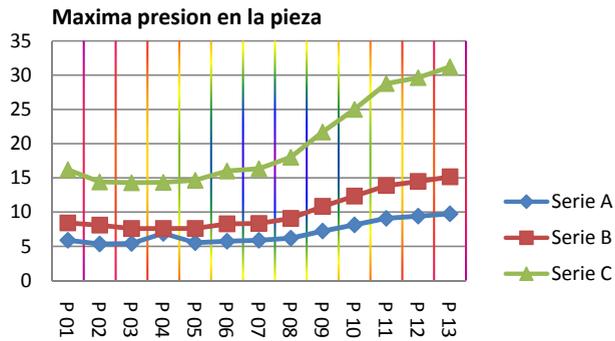
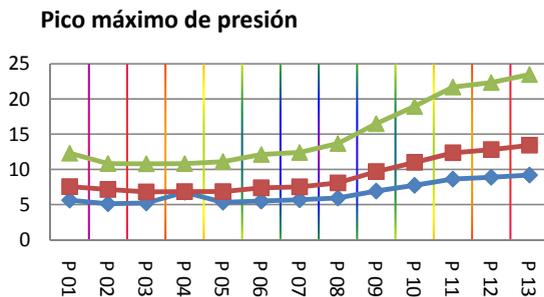


Figura 26: Grafico X-Y para la presión en la pieza

Omitimos el comportamiento de las variables de la máxima presión y pico máximo de presión dado que ambas variables tienen un comportamiento análogo al de la presión de inyección visto en la fase de llenado, se exponen las graficas únicamente.

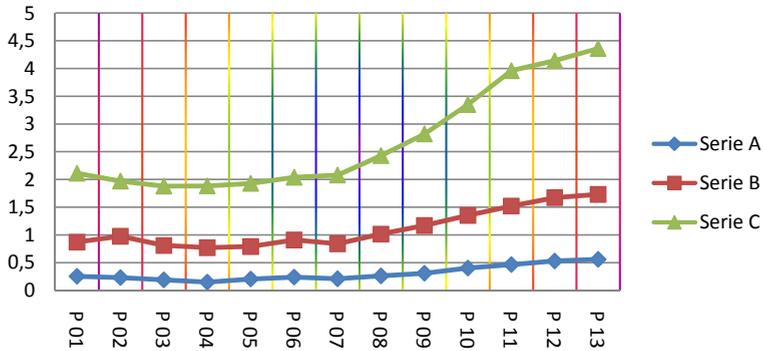


Gráfica 55: Máxima presión en la pieza



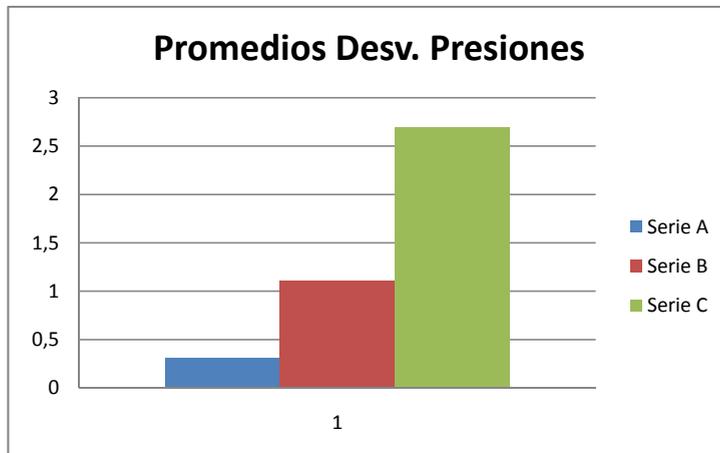
Gráfica 56: Pico máximo de presión

En cuanto a la diferencia entre ambas variables el gráfico que define su comportamiento es:



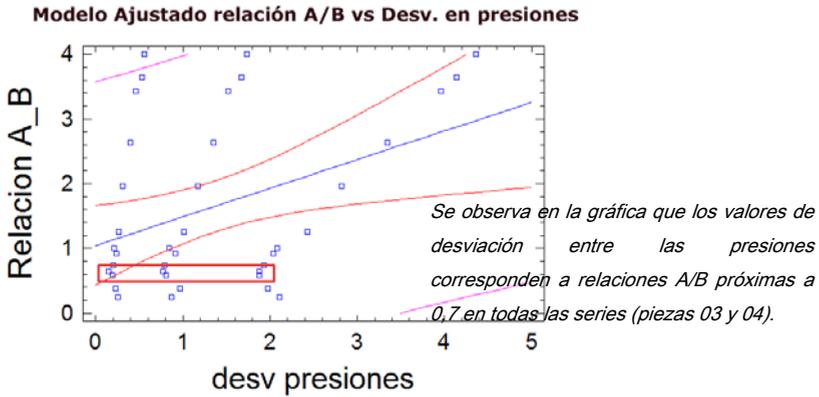
Gráfica 57: Diferencia entre máxima presión y pico máximo de presión en pieza

Se puede comprobar visualmente que según aumentamos la relación A/B la diferencia entre las presiones aumenta a partir de una relación A/B superior a 1, para relaciones inferiores a 1 el comportamiento es casi constante, observamos que las que menor valor tienen son las **piezas 3 y 4** en todas las series. También se puede ver que es la serie A es la que posee unos valores más adecuados (más bajos) para el procesado. Aumentando los valores medios de las series según disminuimos el espesor.

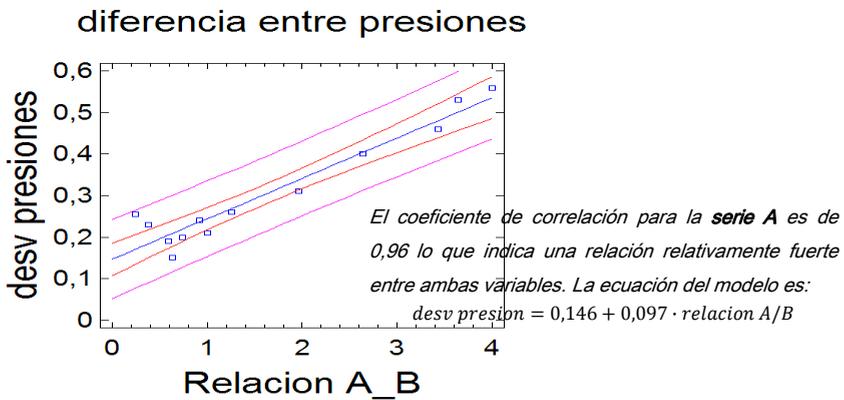


Gráfica 58: Promedios de las diferencias entre la presión máxima y el pico máximo de presión.

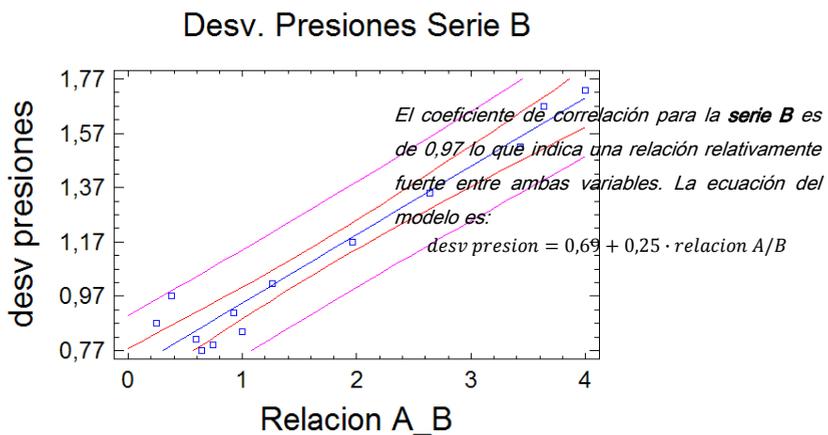
Analizaremos la relación entre estas dos variables con el Statgraphics.



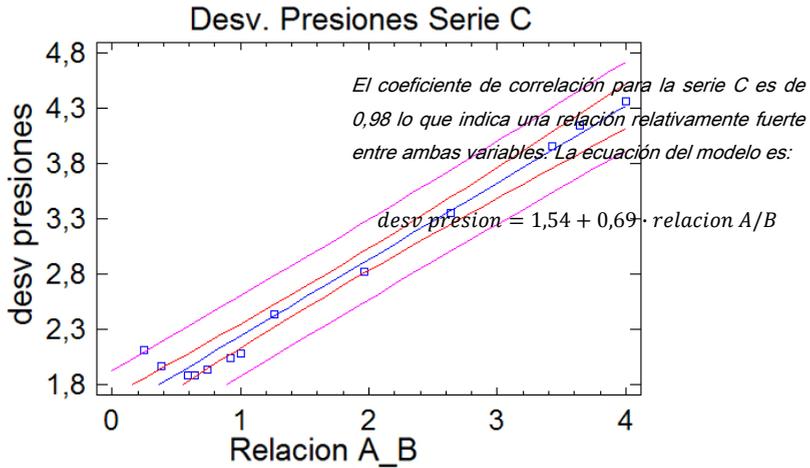
Gráfica 59: Coeficiente de correlación para la diferencia en las presión en la pieza en todas las series.



Gráfica 60: Coeficiente de correlación en la diferencia de presiones en pieza en la serie A



Gráfica 61: Coeficiente de correlación de la diferencia entre presiones en la pieza de la serie B



Gráfica 62: Coeficiente de correlación para la diferencia de presiones en pieza en la serie C.

Se aprecia a través de los valores de los coeficientes de correlación que la relación, es fuerte y que esta aumenta según disminuimos el espesor.

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza altos para reducir la diferencia entre las presiones máximas y el pico máximo de presión. Por otro lado existe relación fuerte entre esta variable y la relación A/B, dándose los mejores valores en los valores bajos de la relación A/B (piezas 03 y 04).***

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un gráfico en 3D a la variable independiente de la diferencia de presiones.

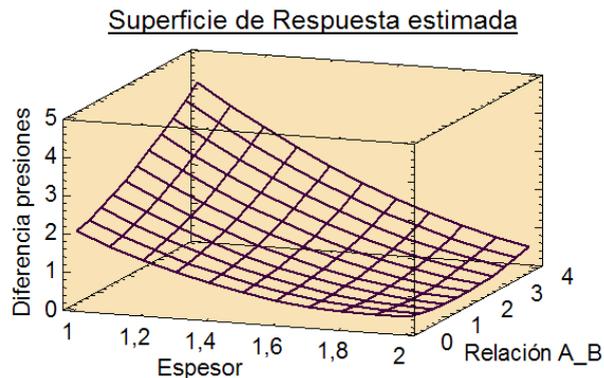
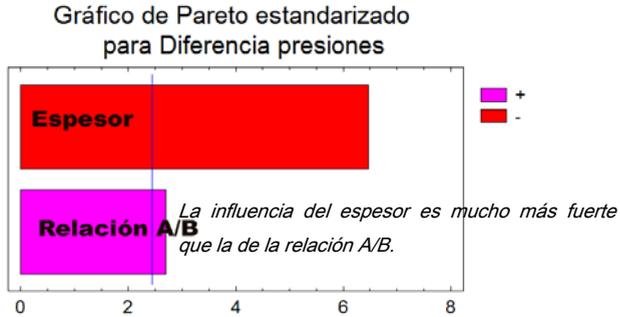


Figura 27: Superficie respuesta para la diferencia de presiones.

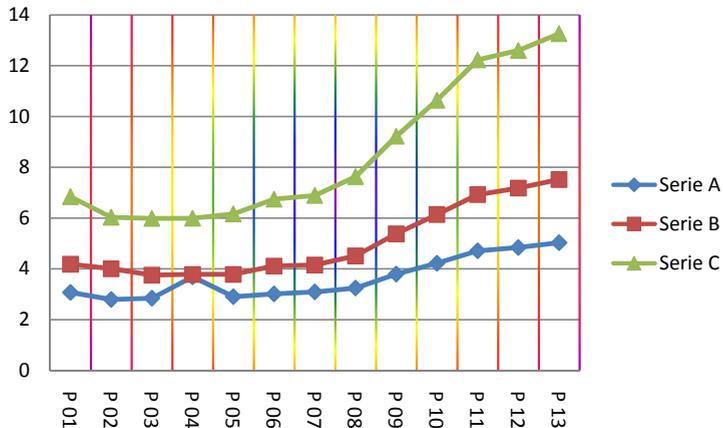
En este caso si disminuimos el espesor la diferencia de presiones decrece, lo cual es positivo, mientras que si disminuimos la relación A/B, también hace decrecer la diferencia de presiones. La influencia de las variables dependientes viene marcada según el gráfico siguiente:



Gráfica 63: Pareto de influencia para la diferencia de presiones.

6.2.2. Fuerza de cierre en la compactación

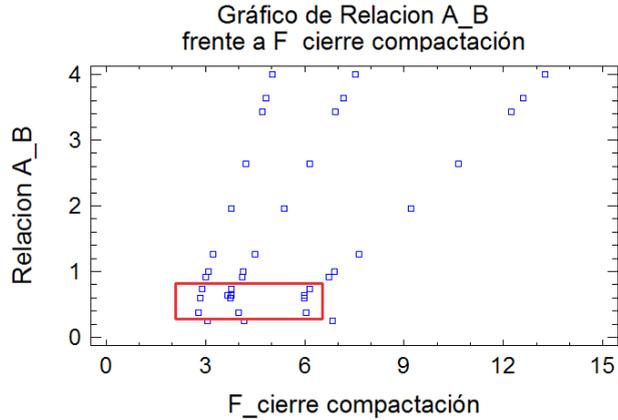
Dado que la fuerza de cierre es consecuencia directa de la presión de inyección es obvio que para valores de presión máxima altos corresponderán unos valores de fuerza en la compactación elevados. Veamos las graficas.



Gráfica 64: Fuerza de cierre en la compactación.

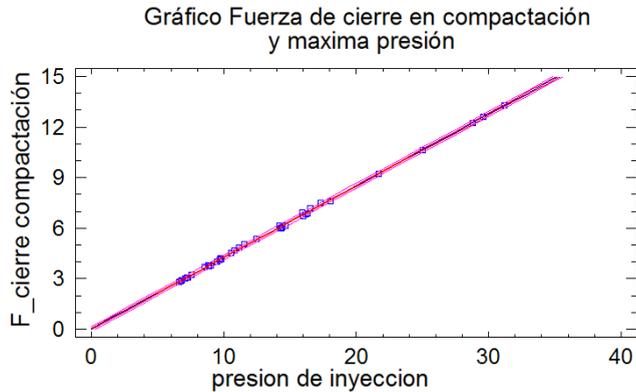
Como se preveía la gráfica toma la misma forma que la que se da en la gráfica de presiones máximas, exceptuando el punto 4 de la serie A que se sale del comportamiento general. Exceptuando este valor de la pieza 04 en la serie A, los valores más adecuados

corresponden también a las piezas 03 y 04. Y como lo que nos interesa es minimizar la fuerza de cierre la serie más adecuada sería la serie A con espesor de 2 mm y dentro de cada serie los valores adecuados atendiendo a la relación A/B serían valores de relación A/B por debajo de 1 y más concretamente para relaciones entre 0,38 y 0,74 piezas 02 y 05 respectivamente, lo cual se puede ver en la siguiente gráfica.



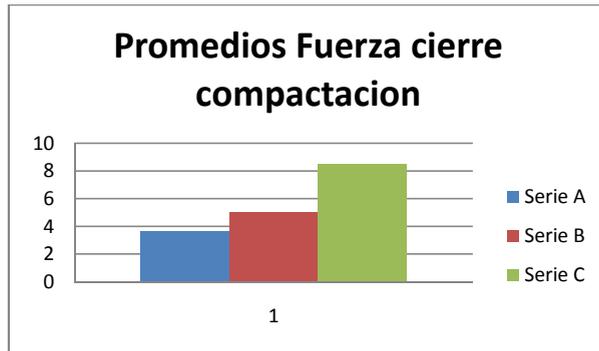
Gráfica 65: Coeficiente de correlación en la fuerza de cierre para la compactación

Para ver la fuerza de la relación entre la fuerza de compactación y la máxima presión de inyección podemos observar la grafica siguiente [Gráfica 66]:



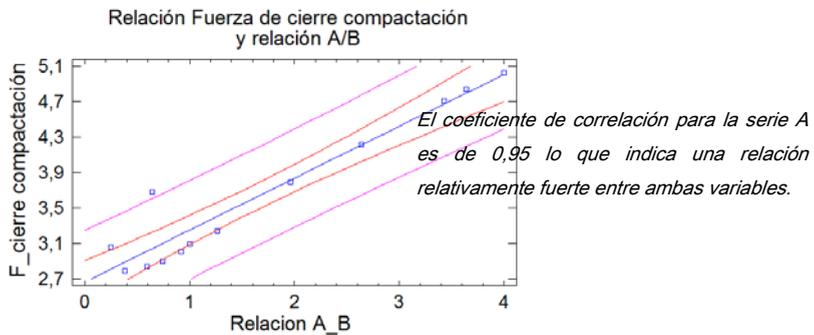
Gráfica 66: Relación fuerza de cierre en compactación con la presión máxima de inyección en compactación.

Si comparamos los valores promedios en la gráfica inferior [Gráfica 67] podemos ver que es la serie A la serie con valores de fuerza de cierre más bajos de fuerza de cierre y le sigue de cerca la serie B, la serie C con 0,5 mm de diferencia con respecto a su anterior casi la duplica.

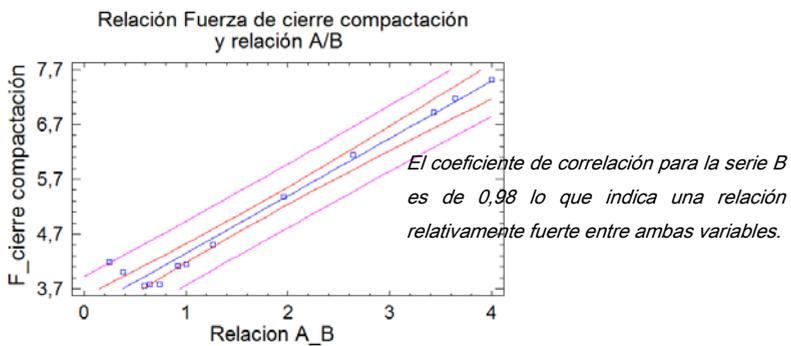


Gráfica 67: Promedios de la fuerza de cierre para las distintas series.

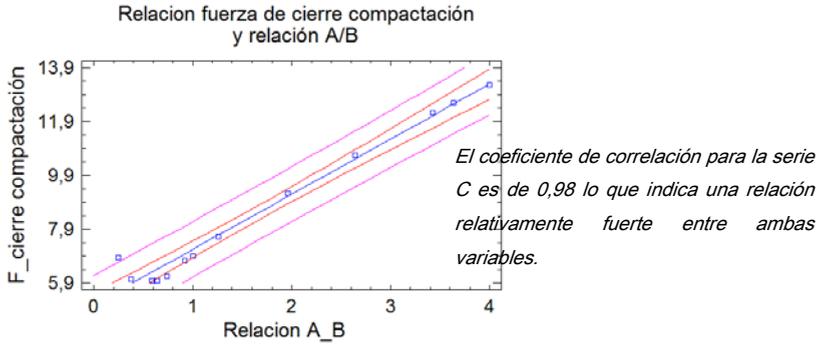
Y según los índices de correlación entre la fuerza de cierre en la compactación y la relación A/B, vemos que se ajustan mas las series B y C que la serie A.



Gráfica 68: Coeficiente de correlación de la fuerza de cierre en la compactación serie A



Gráfica 69: Coeficiente de correlación para la fuerza de cierre en compactación en serie B



Gráfica 70: Coeficiente de correlación de la fuerza de cierre en la compactación en la serie C

*Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con **espesores de pieza altos para reducir la diferencia entre las presiones máximas y el pico máximo de presión. Por otro lado existe relación fuerte entre esta variable y la relación A/B, dándose los mejores valores en los valores bajos de la relación A/B (piezas 02, 03 y 04).***

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la fuerza de cierre en la compactación.

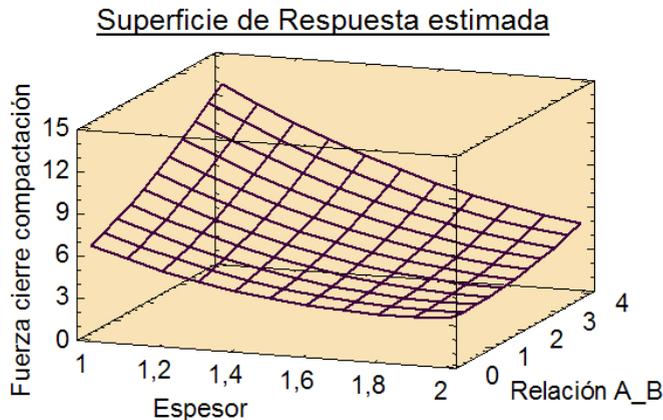
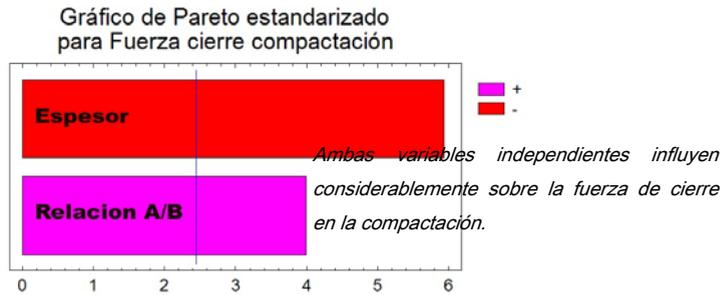


Figura 28: Superficie de respuesta para la fuerza de cierre en la compactación.

Dado que la fuerza de cierre en la compactación es una consecuencia de la fuerza de inyección, esta variable se comporta de la misma forma, tendiendo a disminuir para espesores altos y tendiendo a aumentar para relaciones A/B altas.

La fuerza con la que influyen las variables dependientes sobre la fuerza de cierre en la compactación se observa en el gráfico siguiente.



Gráfica 71: Pareto de influencia para la fuerza de cierre en la compactación

6.2.3. Deformación

Esta variable va referida a la diferencia de forma entre la cavidad del molde y la pieza al final de la compactación, esta diferencia será la que tome la pieza al salir del molde, es muy importante mantener una estabilidad dimensional en las piezas para que no diverjan de la forma original de la pieza, es este un factor muy importante si deseamos obtener precisión dimensional, por lo tanto esta deformación debe minimizarse.

El factor que así se cita es referido a la deflexión dada en todas las componentes X, Y, Z. En comportamiento general de la deformación para todas las series es el siguiente [Figura 29]:

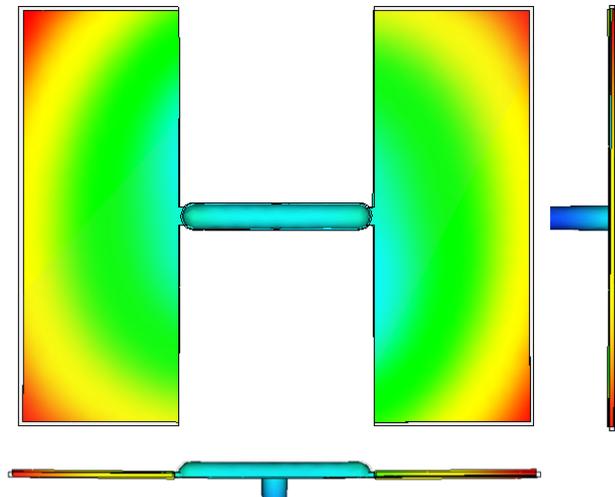
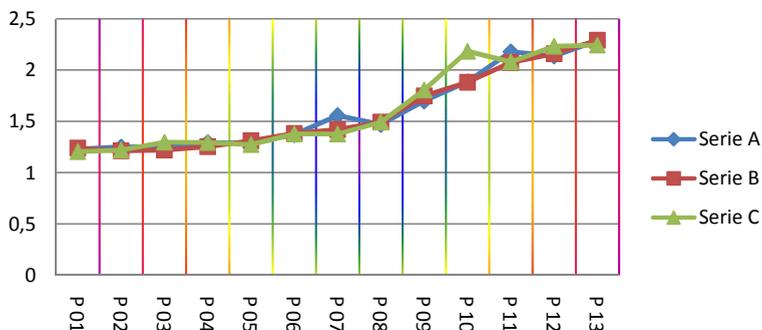


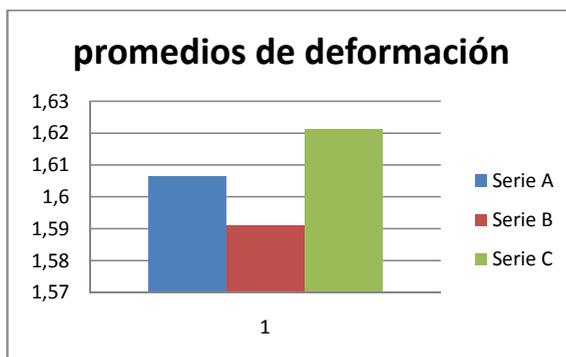
Figura 29: Deflexión de la pieza X-Y-Z

La línea negra perfilada por el exterior de la pieza corresponde a la forma original mientras que la zona coloreada corresponde a la forma final, se aprecian perfectamente las desviaciones entre ambas formas, retrayéndose hacia el centro las piezas y flectando hacia abajo.



Gráfica 72 : Deformación de la pieza

A pesar de tener espesores bien distintos entre las series parece que este factor no afecta de forma evidente sobre la deformación [Gráfica 72], vemos como la mayoría de los datos se superponen. Los valores promedios de las series son los siguientes:

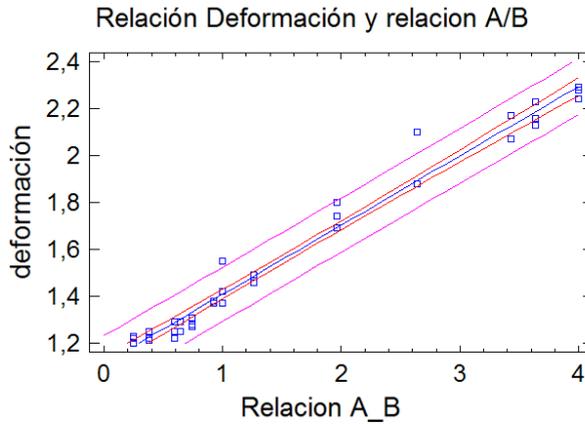


Gráfica 73: Promedios de la deformación para las distintas series.

La diferencia entre las series es pequeña, de la serie B a la serie C que son los promedios mínimo y máximo respectivamente van 0,3 unidades, probablemente se deba a esos puntos aislados que se observan en la gráfica de deformación.

En cuanto a la relación de la deformación con la relación A/B, si que se observa una tendencia al alza a menudo que esta relación aumenta por encima de 1, manteniendo en los valores más bajos para las piezas 02 hasta la pieza 04.

Si observamos el coeficiente de correlación para todas las series vemos que existe una relación relativamente fuerte entre las variables con un coeficiente de correlación de 0,98.



Gráfica 74: Coeficiente de correlación para la deformación y la relación A/B

Dadas las condiciones de trabajo que se observan a través de las variables parece más correcto a efectos de disminuir las condiciones de trabajo de la máquina así como las tensiones internas del material trabajar con configuraciones de piezas con una relación A/B inferior a 1 más concretamente que se encuentre entre 0,38 y 0,64. Correspondiente a las piezas 02, 03 y 04. Por otro lado decir que el espesor no afecta a la deformación

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la deformación.

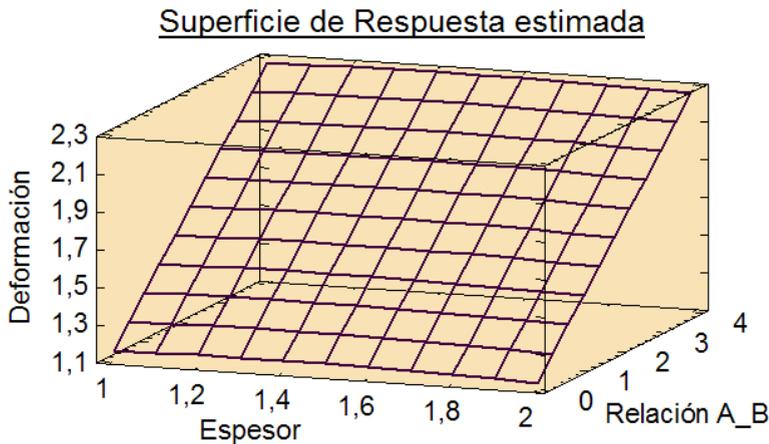
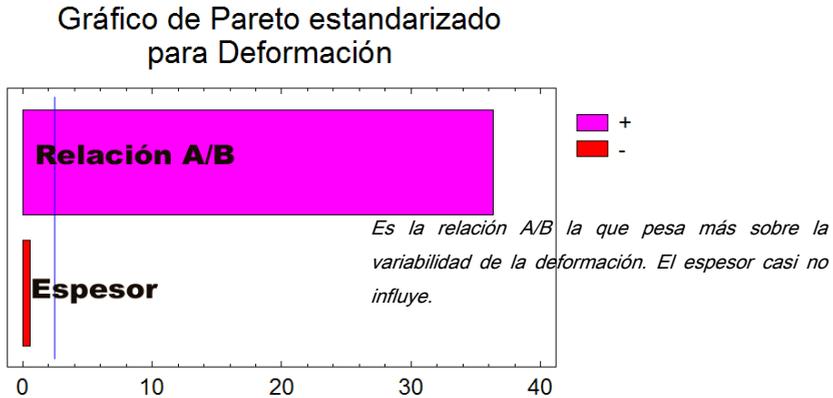


Figura 30: Superficie respuesta de la deformación

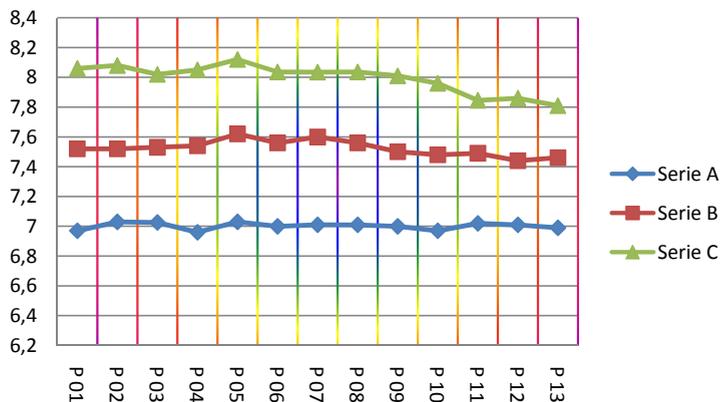
En esta gráfica se observa claramente que es la relación A/B la que más influye sobre la deformación, dándose mayores deformaciones al aumentar dicha relación. En la grafica inferior vemos que peso toman cada una de las variables independientes.



Gráfica 75: Pareto de influencia para la deformación

6.2.4. CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

La contracción volumétrica es la diferencia de volumen entre la pieza final y la cavidad del molde. Cuando esta contracción no es uniforme en toda la pieza, se producen deformaciones. Esta contracción volumétrica es la que se da tras la fase de compactación, y se refiere al valor medio de la pieza. Para una óptima estabilidad dimensional esta variable debe minimizarse. La grafica genérica es la siguiente:



Gráfica 76: Contracción volumétrica

Inicialmente apreciamos la tendencia en las series A y B espesores 2 mm y 1,5 mm respectivamente, es constante según aumentamos la relación A/B. Sin embargo es la serie C la que tiene mayores alteraciones tendiendo a una bajada cuando esta la relación A/B asciende.

Por otro lado la variación de la contracción volumétrica desciende según aumentamos los espesores, siendo la serie A donde menores son las contracciones volumétricas.

Observemos de qué manera afectan estas variables dependientes en un grafico en 3D a la variable independiente de la deformación.

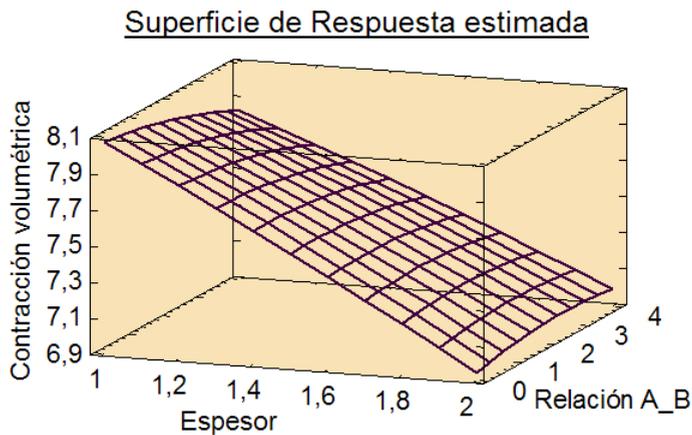
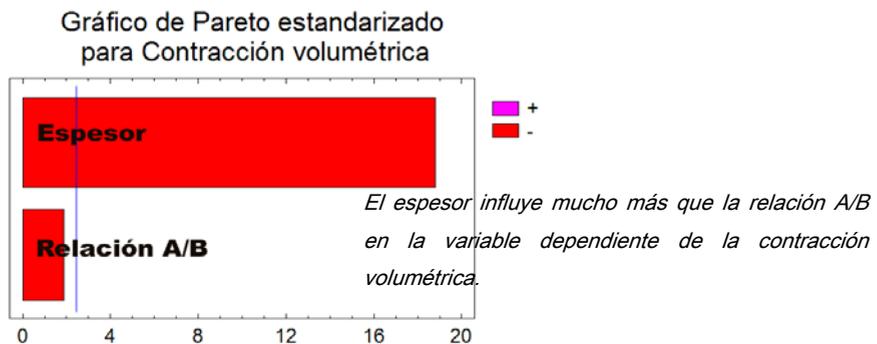


Figura 31: Superficie respuesta para la contracción volumétrica.

La contracción volumétrica disminuye según aumentamos el espesor, mientras que permanece casi estable si modificamos la relación A/B.



Grafica 77: Pareto de influencia para la contracción volumétrica

Recopilación de los datos y observaciones

7. Recopilación de los datos y observaciones

Tras todos estos estudios solo nos queda definir cuáles son los espesores y dimensiones que mejor pueden ofrecer unas características de procesado más acertadas según el valor obtenido de las variables.

Inicialmente nos centraremos en los espesores definiendo cual es el espesor que nos ofrece un mejor equilibrio entre las variables analizadas.

Es casi seguro que a la hora de diseñar una pieza la procesabilidad del producto destinado a ser inyectado no se tiene muy en cuenta pasando este criterio a tomar los últimos lugares a la hora de realizar la elección de parámetros dimensionales. Motivos estéticos o de resistencia estarán por encima o bien anularán las razones por las cuales es conveniente optar por unas dimensiones adaptadas a la óptima inyección de la pieza.

No obstante si son compatibles las dimensiones con todos los criterios de procesabilidad, resistencia, estética, funcionalidad, etc, ¿por qué no variar estas dimensiones adaptándolas a una rentabilidad en el ciclo de inyección?

De forma concluyente veamos cómo afectan el espesor a las variables de inyección en su fase de llenado y de compactación a través de la siguiente tabla.

Presión de inyección	si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Fuerza de cierre	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Temperatura 95%	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Desviación temperaturas	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Tensión de cizalla	Si	↑ cuando el espesor ↓ (sensiblemente)
Velocidad de cizalla	Si	↑ cuando el espesor ↓ (sensiblemente)
Tiempo expulsión pieza	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↑
Diferencia presiones	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Fuerza cierre en compactación	Si	↑ ↑ cuando el espesor ↓
Deformación	No	
Contracción volumétrica	si	↑ ↑ cuando el espesor ↓

Tabla 20: Tabla de dependencia entre las variables y el espesor

Este estudio nos indica que para una pieza de este tipo, plana, sin línea de partición, los espesores y las dimensiones adecuadas para una inyección más eficiente corresponden a un modelo concreto que extraemos a continuación a través de la siguiente matriz de prioridades.

	llenado						Compactación				
	presión de inyección	Fuerza de cierre	temperatura 95%	Tensión de cizalla	velocidad de cizalla	Desviación temperatura	Tiempo expulsión pieza	diferencia presiones	fuerza de cierre	deformación	Totales
Serie A	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	12
Serie B	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	19
Serie C	3	3	3	3	3	3	1	3	3	1	31

Tabla 21: Matriz de prioridades para las tres series (espesores).

Para entender estos datos es conveniente saber inicialmente que todas las variables deben minimizarse, y que todas las variables tienen la misma importancia si querer entrar en la discusión de si es más importante un modo económico de trabajo con presiones de inyección bajas o por el contrario dar más importancia a los tiempos de expulsión de pieza para obtener mayor rentabilidad.

A todas las variables se les da una puntuación de 1 a 3, dando el valor de 1 a la serie que más minimice esa variable, y otorgando el 3 a la serie que más maximice la misma variable. Obteniéndose después de valorar todas las variables una puntuación total correspondiente a la suma de todas las ponderaciones, la serie cuya puntuación final sea inferior, será la serie con el espesor que mejores condiciones para inyectar nos ofrecería.

La tabla indica que es la serie A (espesor de 2 mm) la que menor puntuación tiene y que es con este espesor de 2 mm donde se dan las mejores condiciones de trabajo.

Existe un punto negativo en esta serie que es el tiempo de expulsión ya que está 4 segundos por encima de los tiempos de la serie B, un 40% más de ciclo que desde si lo vemos desde un punto de vista de rentabilidad este sería un factor que excluiría esta serie de inmediato, situándonos en la serie B o C.

También tenemos otro segundo punto que desde el punto de vista de rentabilidad no es muy adecuado, se trata de la cantidad de material, mientras que la serie C la pieza pesa 5,74 gramos, la pieza de la serie A pesa 10,35 gramos, casi el doble. Para solicitaciones tensionales bajas no compensa un espesor elevado si el servicio va a ser el mismo que para una pieza con un espesor inferior.

No obstante a no ser que se requieran unos espesores amplios por razones de estética, de robustez, etc, se debe ir a espesores bajos a pesar de que son los espesores que no ofrecen una inyección eficiente o menos eficiente que con espesores más elevados. Con respecto a estos últimos párrafos destinados a un análisis de rentabilidad entre espesores altos o bajos es mi deber mencionar de nuevo el artículo de Yuh-Min Chen, Jang_jong Liu [9] donde analizan esta cuestión.

Un punto intermedio entre ambas opciones sería trabajar dentro de los valores de la serie B, dado que sin unas pérdidas importantes de ciclo con respecto a la serie C (2 segundos) ofrece unas condiciones de inyectado bastante aceptables, que pudieran compensar el coste económico perdido por la diferencia de ciclo.

Concluyendo podemos decir que para situaciones donde una inyección eficiente es lo importante y el tiempo de ciclo es secundario nos decantamos contundentemente por la serie A, espesores altos, mientras que si nos decantamos por obtener una inyección rentable y el tiempo de ciclo prima por encima de las condiciones favorables de inyección, nos decantaremos por la serie C. Si buscamos un equilibrio entre ambos aspectos, inyección eficiente o tiempo de ciclo nos decantamos por la serie B.

En cuanto a la relación A/B vamos a ver cuáles son las disposiciones más eficientes de la misma manera que hemos analizado el espesor, es decir ponderando cada una de las variables, en este caso ponderamos de 1 a 13, ya que tenemos 13 disposiciones distintas. Las relaciones entre las variables examinadas y la variable relación A/B se ven a continuación.

Presión de inyección	si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Fuerza de cierre	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Temperatura 95%	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Desviación temperaturas	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑ (sensiblemente)
Tensión de cizalla	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑ (solo serie C)
Velocidad de cizalla	No	
Tiempo expulsión pieza	No	
Diferencia presiones	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Fuerza cierre en compactación	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Deformación	Si	↑ ↑ cuando la relación A/B ↑
Contracción volumétrica	No	

Tabla 22: Tabla de dependencia entre las variables y la relación A/B

Para la **serie A** los resultados de la tabulación son los siguientes:

serie A	presión de inyección	Fuerza de cierre	temperatura 95%	Tensión de cizalla	velocidad de cizalla	Desviación temperatura	Tiempo expulsión pieza	diferencia presiones	fuerza de cierre	deformación	totales
Pieza 01	5	6	5	13	13	6	4	7	5	1	65
Pieza 02	1	8	1	2	2	1	10	5	1	2	33
Pieza 03	2	2	2	10	10	4	6	2	2	2	42
Pieza 04	9	12	8	6	6	2	4	1	8	4	60
Pieza 05	3	4	3	4	4	3	4	3	3	3	34
Pieza 06	4	1	4	8	8	7	3	6	4	5	50
Pieza 07	6	7	6	5	5	5	7	4	6	7	58
Pieza 08	7	3	7	7	7	9	1	8	7	6	62
Pieza 09	8	5	9	9	9	8	2	9	9	8	76
Pieza 10	10	9	10	3	3	11	5	10	10	9	80
Pieza 11	11	10	11	1	1	12	8	11	11	10	86
Pieza 12	12	11	12	11	11	10	8	12	12	11	110
Pieza 13	13	13	13	12	12	13	9	13	13	12	123

Tabla 23: Matriz de prioridades para la relación A/B, teniendo en cuenta todas las variables.

Las piezas mejor valoradas son las piezas 02, 03 y 05 con 33, 42 y 34 puntos respectivamente si desestimamos aquellas variables que según los estudios anteriores no se relacionan con la relación A/B como son la tensión de cizalla, la velocidad de cizalla y el tiempo de expulsión de la pieza, la puntuación variaría considerablemente quedando de la siguiente manera:

serie A	presión de inyección	Fuerza de cierre	temperatura 95%	Tensión de cizalla	velocidad de cizalla	Desviación temperatura	Tiempo expulsión pieza	diferencia presiones	fuerza de cierre	deformación	totales
Pieza 01	5	6	5	0	0	6	0	7	5	1	35
Pieza 02	1	8	1	0	0	1	0	5	1	2	19
Pieza 03	2	2	2	0	0	4	0	2	2	2	16
Pieza 04	9	12	8	0	0	2	0	1	8	4	44
Pieza 05	3	4	3	0	0	3	0	3	3	3	22
Pieza 06	4	1	4	0	0	7	0	6	4	5	31
Pieza 07	6	7	6	0	0	5	0	4	6	7	41
Pieza 08	7	3	7	0	0	9	0	8	7	6	47
Pieza 09	8	5	9	0	0	8	0	9	9	8	56
Pieza 10	10	9	10	0	0	11	0	10	10	9	69
Pieza 11	11	10	11	0	0	12	0	11	11	10	76
Pieza 12	12	11	12	0	0	10	0	12	12	11	80
Pieza 13	13	13	13	0	0	13	0	13	13	12	90

Tabla 24: Matriz de prioridades para la relación A/B descartando las variables que no influyen sobre la relación A/B para la serie A.

Siendo la Pieza con menos puntuación la pieza 03 con 16 puntos, con una relación A/B de 0,59. En segundo lugar tendríamos la pieza 05 y por último la pieza 02. Concluimos esta sección con la afirmación de que las relaciones óptimas para la inyección de piezas rectangulares con un espesor de 2mm sería la que va de 0,25 a 0,74, y más especialmente la que tiene una relación A/B de 0,59 correspondiente a la pieza 03.

Serie B

serie B	presión de inyección	Fuerza de cierre	temperatura 95%	Tensión de cizalla	velocidad de cizalla	Desviación temperatura	Tiempo expulsión pieza	diferencia presiones	fuerza de cierre	deformación	totales
Pieza 01	7	3	7	0	0	8	0	5	6	3	39
Pieza 02	4	8	4	0	0	4	0	7	3	2	32
Pieza 03	2	5	1	0	0	1	0	3	1	1	14
Pieza 04	3	1	2	0	0	3	0	1	2	4	16
Pieza 05	1	4	3	0	0	2	0	2	2	5	19
Pieza 06	5	7	5	0	0	5	0	6	4	6	38
Pieza 07	6	2	6	0	0	13	0	4	5	7	43
Pieza 08	8	9	8	0	0	6	0	8	7	8	54
Pieza 09	9	6	9	0	0	9	0	9	8	9	59
Pieza 10	10	10	10	0	0	10	0	10	9	10	69
Pieza 11	11	11	11	0	0	7	0	11	10	11	72
Pieza 12	12	12	12	0	0	12	0	12	12	12	84
Pieza 13	13	13	13	0	0	11	0	13	13	13	89

Tabla 25: Matriz de prioridades para la relación A/B excluyendo las variables que no influyen serie B.

La ponderación en esta serie es distinta quedando la pieza 04 por delante de la pieza 02, quedando como las mejores relaciones A/B las correspondientes a la Pieza 03, 04, 05, con relaciones A/B de 0.59 a 0.74. De nuevo en esta serie la pieza que mejor puntuación tiene es la pieza 03 con la relación A/B de 0,59. Recordar que se han eliminado de la ponderación aquellas variables que no dependen de la relación A/B como son la tensión de cizalla, la velocidad de cizalla y el tiempo de expulsión de la pieza.

Serie C

Serie C	presión de inyección	Fuerza de cierre temperatura 95%	Tensión de cizalla	velocidad de cizalla	Desviación temperatura	Tiempo expulsión pieza	diferencia presiones	fuerza de cierre	deformación	totales
Pieza 01	6	4	7	7	0	13	0	7	6	1 51
Pieza 02	3	8	2	3	0	2	0	4	3	27
Pieza 03	1	3	1	1	0	3	0	1	1	5 16
Pieza 04	2	2	3	2	0	7	0	2	2	4 24
Pieza 05	4	1	4	6	0	9	0	3	4	3 34
Pieza 06	5	6	5	4	0	5	0	5	5	6 41
Pieza 07	7	5	6	5	0	11	0	6	7	7 54
Pieza 08	8	7	8	8	0	11	0	8	8	8 66
Pieza 09	9	9	9	9	0	10	0	9	9	9 73
Pieza 10	10	10	10	10	0	8	0	10	10	10 78
Pieza 11	11	11	11	11	0	4	0	11	11	11 81
Pieza 12	12	12	12	12	0	6	0	12	12	12 90
Pieza 13	13	13	13	13	0	1	0	13	13	13 92

Tabla 26: Matriz de prioridades para la relación A/B sin tener en cuenta las variables que no influyen sobre la relación A/B serie C

Para esta serie C (1 mm de espesor) de nuevo las piezas que obtienen mejor puntuación son las piezas 03, 04 y 02 con 16, 24 y 27 puntos respectivamente, siendo la que mejor puntuación tiene la pieza 03 de nuevo con la relación A/B. En este caso dado que la tensión de cizalla sí que se relaciona con la relación A/B no se ha desestimado del cómputo.

Resumiendo tenemos que:

	1º lugar	2º lugar	3º lugar
Serie A	Pieza 03	Pieza 02	Pieza 05
Serie B	Pieza 03	Pieza 04	Pieza 05
Serie C	Pieza 03	Pieza 04	Pieza 02

Tabla 27: Resumen de las piezas que mejor se inyectan

En todas las series tenemos como mejor opción la pieza 03 correspondiente a una relación A/B de 0,59 por lo tanto independientemente del espesor que tomemos, la mejor opción es emplear dicha relación si es posible.

RELACION CON EL NUMERO PHI

8. Relación con el número Phi.

Si bien la finalidad del estudio era comprobar cuales eran las dimensiones aconsejables para obtener unas características de procesabilidad óptima en la inyección de esta pieza plana, y sin querer introducirme en exceso en la explicación del número Phi, no puedo finalizar este trabajo sin resaltar la estrecha relación de las conclusiones aquí extraídas con el famoso número phi.

El número phi es proclamado desde tiempos inmemorable como la proporción divina, más conocido como el número áureo. Este número phi corresponde a la relación que existe entre la relación de lados de un rectángulo y que cumple una serie de propiedades que aquí no se van a explicar dado que conllevaría un nuevo estudio, pero lo que sí que es cierto es que esta proporción entre los lados de un rectángulo ha sido proclamada como la proporción equilibrada entre los lados del rectángulo.

Utilizada por arquitectos griegos y romanos, ha servido para dimensionar obras arquitectónicas como el panteón de Atenas, posteriormente en la era del renacimiento Leonardo da Vinci la emplea para sus dibujos y sus inventos, la Gioconda guarda unas proporciones de acuerdo con este número Phi entre otras obras de la época, y más cerca de nuestros tiempos es LeCorbusier el que propone esta proporción en detrimento de las unidades métricas.

No es solo el ser humano el que hace uso de esta proporción, hay muchos ejemplos en la naturaleza donde las formas se apropian de este número para su propia creación, por ejemplo en muchos árboles se da que las hojas crecen alrededor de la rama formando una espiral cuyas dimensiones corresponde a esta proporción, las pipas de girasol se colocan cubriendo también esta misma espiral basada en el número Phi, existen muchos ejemplos más que aquí no se detallan.

¿Y qué tiene que ver el número phi con el estudio en cuestión? El rectángulo que se muestra a continuación es un rectángulo áureo, donde la proporción entre sus lados nos da el número phi.

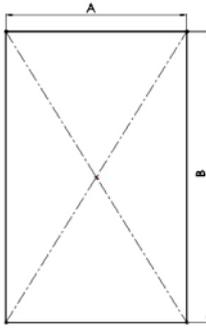


Figura 32: Rectángulo áureo

$$\frac{B}{A} = \phi = 1.618$$

Las proporciones de la pieza 03 son las que se muestran en la imagen inferior.

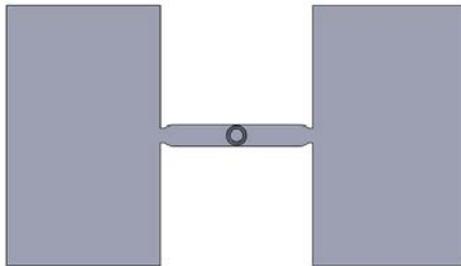


Figura 33: Proporciones de la pieza 03

$$\frac{B}{A} = \frac{65.1}{38.4} 1.69$$

Si superponemos ambas tenemos:

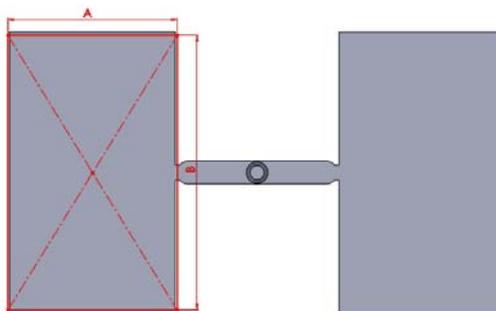


Figura 34: Superposición de rectángulo áureo con la proporciones de la pieza 03A

Proporciones muy similares si duda alguna. *Esto es válido siempre y cuando inyectemos desde el centro de la pieza y por el lado más largo (B).*

CONCLUSIONES FINALES

9. Conclusiones finales

Como conclusión y recopilación definitiva de los datos obtenidos tenemos en primer lugar definir aquellas variables independientes que más influyen y que peso tienen sobre las variables dependientes del proceso de inyección.

En segundo lugar optimizamos las distintas variables de espesor y relación A/B para ver cual es aquel valor que minimiza el valor de la variable dependiente.

En el grafico siguiente se observa cual es el *peso* de cada una de las variables dependientes, y cuál de ellas influye más sobre la variable del proceso.

Para hacernos una idea del alcance de la dependencia de una variable independiente con la variable del proceso, en el caso de la deformación, está variable mantiene un coeficiente de correlación del 0,99.

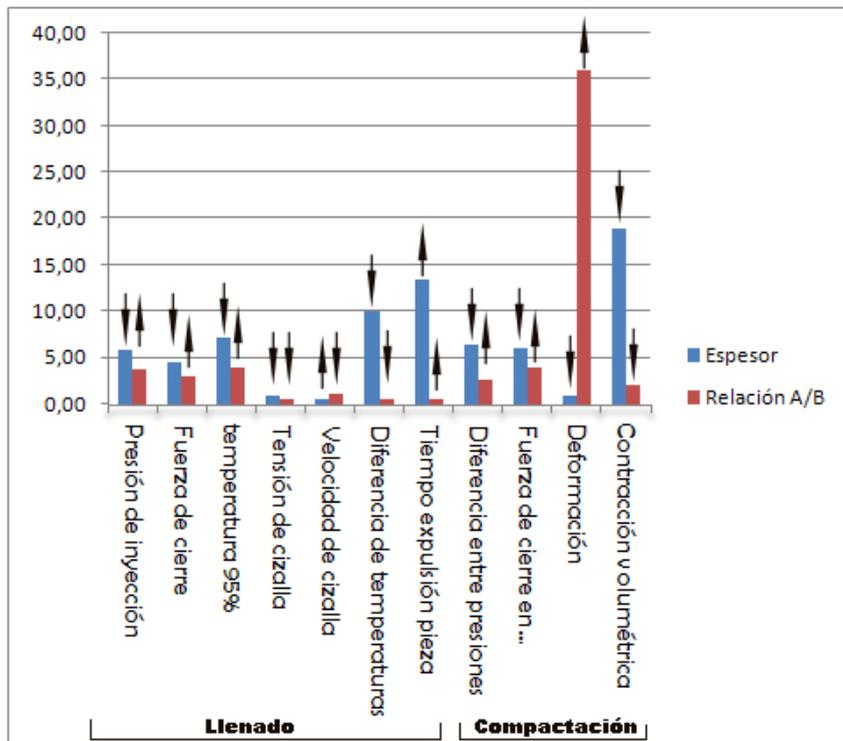


Figura 35: Fuerza de la Influencia de las distintas variables en la inyección de la pieza.

Las flechas situadas sobre las barras describen la dirección de la relación, por ejemplo la variable de presión de inyección aumenta cuando disminuye el espesor (flecha hacia abajo) y si aumenta la relación A/B (flecha hacia arriba).

En cuanto al segundo punto el de definir el espesor y la relación A/B que mejores características de procesabilidad ofrece, tenemos que es la serie A y la pieza 03 con relación A/B igual a 0.59 las que más minimizan las condiciones de inyección.

Reiterando aspectos anteriores, decir que esta es la conclusión definitiva dada una serie de variables obtenidas en el proceso de inyección estudiadas en su comportamiento al modificar otras variables de entrada.

Solo se han tenido en cuenta los factores implícitos en la procesabilidad de la pieza, si tuviéramos en cuenta criterios de rentabilidad y necesidades de diseño, la elección del espesor con el que trabajar sería la serie C (*a falta de análisis de rentabilidad*) y si buscamos un equilibrio entre ambos factores procesabilidad y economía y resistencia, nos decantaríamos por las serie B.

Lo que no cabe ninguna duda es que en las tres series las mejores opciones de relación A/B recaen sobre la pieza 03.

Quedaría pendiente una vez obtenidos los modelos que rigen la naturaleza de las variables dependientes en función del espesor y de la relación A/B obtener los valores de estas variables (espesor y relación A/B) que minimizan la variable dependiente y contrastarla con los valores obtenidos a través del MoldFlow, También sería interesante reflejar la desviación existente entre los modelos ajustados frente a los resultados obtenidos en el MoldFlow, comparar los resultados obtenidos a través del MoldFlow y los modelos obtenidos está fuera del alcance de este trabajo.

Otro punto que sería interesante analizar en base a lo que dicen J.K.L.Ho, K.F.Chu, C.K.Mok ^[9] una comparativa objetiva en cuanto a los costes de producción asociados a la inyección de las piezas, dado que ellos sostienen que para el caso de la pieza que han examinado, es más económico aumentar el espesor de la pieza donde el ahorro radica en la disminución del consumo eléctrico al disminuir las presiones de inyección.

PROGRAMAS EMPLEADOS

10. Programas empleados

SolidWorks 2010: programa de diseño asistido por ordenador empleado para la realización del modelo y su estudio de diseño

Microsoft Office Excel 2007: programa de hoja de cálculo empleado para el análisis de datos obtenidos, generación de gráficos y tablas.

Microsoft Office Word 2007: Programa procesador de textos para la redacción del trabajo

Statgrafics plus: programa de hoja de cálculo con funciones estadísticas asociadas, empleado para la ejecución de análisis estadísticos, dependencia entre variables y superficies respuesta.

Adobe Photoshop CS 3: Programa de retoque fotográfico y de imágenes empleado para la adaptación y retoque de las imágenes que aparecen en el estudio.

Autodesk MoldFlow insight 2010: Programa de simulación de inyección y otros procesos plásticos empleado para observar la simulación de llenado de las piezas a estudio.

BIBLIOGRAFIA

11. Bibliografía

[1]. Hamdy Hassan, Nicolas Regnier, Guy Defaye " A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding" International Journal Of Heat and fluid flow, 2009.

[2] Gujian, H.A, Xuemei, L.b. Xiaoyu, W.a y Jibin, L.a. "Optimized Design of cavity layout and feed system of multi-cavity injection mould". 2008.

[3] Zhai. M, Lam, L.C ; y Au, C.K "Runner sizing and weld line positioning for plastic injection moulding with multiple gates" .2006.

[4] K.S. Lee, J.C.Lin, "Desing of the runner and gating system parameters for a multi-cavity injection mould using FEM and neural network". 2005.

[5] Shen, Yk, Wu. Cw, Yu. Yf y Chung, Hw "Analysis for optical gate desing of thin-walled injection molding. 2008.

[6] Zhai. M, Lam. Y.C, Au. C.K. y Liu D.S. "Automated selection of gate location for plastic injection molding processing". 2005.

[7] Chun-Yin Wu, Chih-Chiang Ku, Hsin-yi Pai. "Injection molding optimization with weld line desing constraint using distributed multi-population genetic algorith". 2010.

[8] J.K.L. Ho, K.F.Chu, C.K.Mok. "Minimizing manufacturing cost for thin injection plastic components". 2004.

[9] Y.M.Deng, D. Zheng, X.J. Lu. "Injection moulding optimization of multi-class desing variables using a PSO algorithm". 2007.

[10] Pichai Jariyatammanukul, Nipat Paecheroenchai, Patcharaphol Pomkajohn y Somjate Patcharaphun. "Effect of thickness on weld line strength of injection molded thermoplastic composites. 2009.

[11] Ozcelik. B y Sonat. "Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding". 2009.

[12] Yimin Deng y Di Zheng " Minimizing the thicknesses of injection-Molded plastic parts base don a MoldFlow Simulation". 2007.

[13] S.S.S. Imihezri, S.M. Sapman, S. Sulaiman, M.M.Hamdan, E.S. Zainuddin, M.R. Osman, M.Z.A. Rahman. "Mould flow and component desing analysis of polymeric based composite automotive clutch pedals". 2005.

[14] Jiang Bing-yan, Chu Chun-Peng, Tang Mei-lin y Shen Long-jiang. "Influence of part's geometry characters on filling length of injection molded parts with high aspect ratio micro structures. 2008.

[15] C.K. Mok, F.S.Y. Wong. "Automatic feature recognition for plastic injection moulded part desing." 2005.

[16] Rawin Raviwonge, Venkat Allada. "Artificial Neural Network based model for computation of injection mould complexity".1997.

[17] M. Marquez, A. White, R.Gill. "A hybrid neural network-feature-based manufacturability y analysis of mould reinforce plastic parts".2001

[18] Yuh-Min Chen, Jang_jong Liu. "Cost-effective desing for injection molding". 1997.

[19] K.C. Hui. " Geometric aspects of the mouldability of parts". 1997.

[20] Kwai-Sang Chin, T.N.Wong. "Knowledge-based Evaluation for the conceptual desing development of injection molding parts".1996.

[21] P. K. D. V. Yarlagadda. "Prediction of processing parameters for injection moulding by using a hybrid neural network". 2001.

[22] Chih-Cherng Chen, Pao-Lin Su, Yan-Cherng Lin. "Analysis and modeling of effective parameters for dimension shrinkage variation of injection molded part whit thin shell feature using response surface methodology". 2009.

[23] Ko-Ta Chiang, fu-Ping Chang. "Application of grey-fuzzy logic on the optimal process desing of an injection-molded part with a thin shell feature". 2005.

[24] Chen. C, Su. P y Lin. Y. " Analysis and modeling of effective parameters for dimensión shrinkage variation of injection molded part with thin Shell feature using response surface methodology. 2009.

[25] Hasan Oktem, Tuncay erzurumlu, Ibraim Uzman. "Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. 2006.

[26] S.H. Tang, Y.J.Tan, S.M.Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail, R. Samin. "The use of Taguchi method in the desing of plastic injection mould for reducing warpage. 2006.

[27] Ming-Chih Huang, Ching-Chih Tai. "the effective factors in the warpage problem of an injection-molded part whit a thin shell feature. 1999.

[28] Zeng. y He.Z.b." Optimal combination of injection molded process parameter base don warp. 2009.

[29] Ozcelik, B y Erzurumlu. "Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin Shell plastic parts using integrated response surface method and generic algorithm. 2005.

[30] Padilla, A. Baselga, J. y Bravo .J. "Comparision of gauge deformation determined by simulation of the injection process whit real process values. 2006.

[31] Cheng. Gd, Liu. St y Guo. X. "A minimum warpage design method for injection molding". 2006.

[32] C. K. Au. A geometric approach for injection mould filling simulation. 2004.

[33] Hong-Seok Park y Xuan-Phuong Dang. "Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastics injection mold. 2010.

[34] Kurt. M, Saban Kamber, Kaynak, Y. Atokok. G y Girit.O. "Experimental investigation of plastic injection molding assessment of the effects of cavity pressure and mold temperatura on the quality of the final products". 2009.

[35] Zhao, Zy, Liao, L y Tang. F. "Moldflow software in a complex plastic Shell injection mold desing. 2008.

[36] "El Gran libro de Solidworks office profesional". Ed. Marcombo Autor : Sergio Gómez Gonzalez.

[37]"A design Guide Part and mold design" Guía de diseño de piezas y moldes elaborada por el fabricante de materiales termoplásticos Bayer.

[38] "Inyección de Termoplásticos. Manual del inyector". Ed. Plastic Communication Autor: Jose luis Arazo Urraca

[39]“Diseño de moldes de inyección de termoplásticos”. Ed. Servicio de publicaciones de la UPV. Autor: Joaquín Pérez Fuster.

[40] MoldFlow desing quide, a resource for plastic engineers” ed. Hanser. Autor Jay Shomaker.

ANEXOS

12. Anexo

12.1. CARACTERÍSTICAS DE MATERIAL

Descripción

Nombre de la familia	POLYPROPYLENES (PP)
Nombre comercial	Isplen PR-290 X9M
Fabricante	Repsol
Abreviación de familia	PP
Estructura del material	Crystalline
Origen de los datos	Moldflow Plastics Labs : pvT-Measured : mech-Supplemental
Última fecha modificada	14-MAR-07
Fecha de ensayo	05-JAN-05
Estado de los datos	Non-Confidential
Id. del material	20576
Código de clase	MAT2285
Código de proveedor	REPSOL
Fibras/cargas	No cargado

Propiedades de Contracción

Modelo de contracción

Tensión residual corregida en tensión de molde (CRIMS)

Contracción nominal observada

Paralelo %

Perpendicular %

Contracción observada

Paralela mínima %

Paralela máxima %

Perpendicular mínima %

Perpendicular máxima %

Propiedades de Procesamiento

Temperatura de la superficie del molde C

Temperatura de masa fundida C

Intervalo de temperaturas del molde (recomendado)

Mínimo C

Máximo C

Intervalo de temperaturas de masa fundida (recomendado)

Mínimo C

Máximo C

Temperatura absoluta máxima de masa fundida C

Temperatura de expulsión C

Esfuerzo de cizalla máximo MPa

Velocidad de cizalla máxima 1/s

Propiedades Mecánicas

Datos de las propiedades mecánicas

Módulo elástico, 1ª dirección principal (E1)	<input type="text" value="1340"/>	MPa
Módulo elástico, 2ª dirección principal (E2)	<input type="text" value="1340"/>	MPa
Coefficiente de Poisson (ν_{12})	<input type="text" value="0.392"/>	
Coefficiente de Poisson (ν_{23})	<input type="text" value="0.392"/>	
Módulo de corte (G12)	<input type="text" value="481.3"/>	MPa
Coefficiente isotrópico transversal de los datos de expansión térmica (CTE)		
Alpha1	<input type="text" value="9.05e-005"/>	1/C
Alpha2	<input type="text" value="9.05e-005"/>	1/C

Propiedades Reológicas

Viscosidad

Modelo predeterminado de viscosidad

Coefficientes del método de pérdida de presión

c1 Pa^{1-c2}

c2

Temperatura de transición

Ttrans C

Índice de viscosidad Moldflow

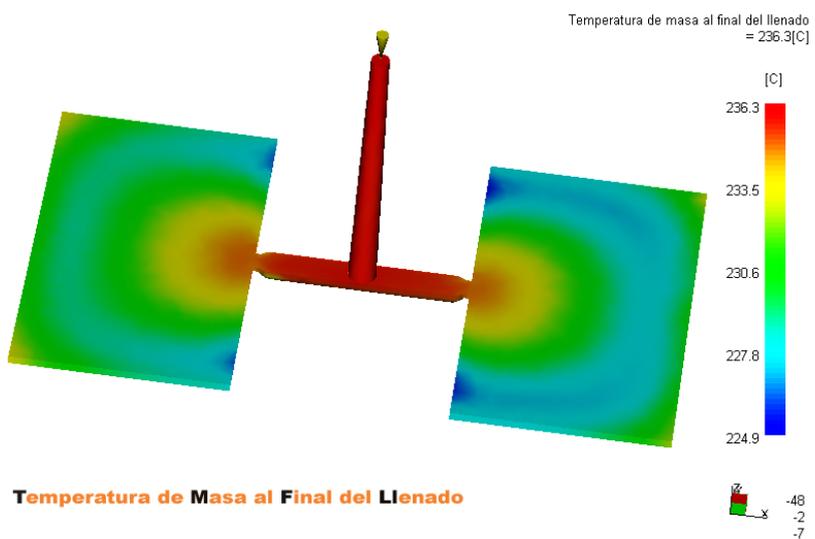
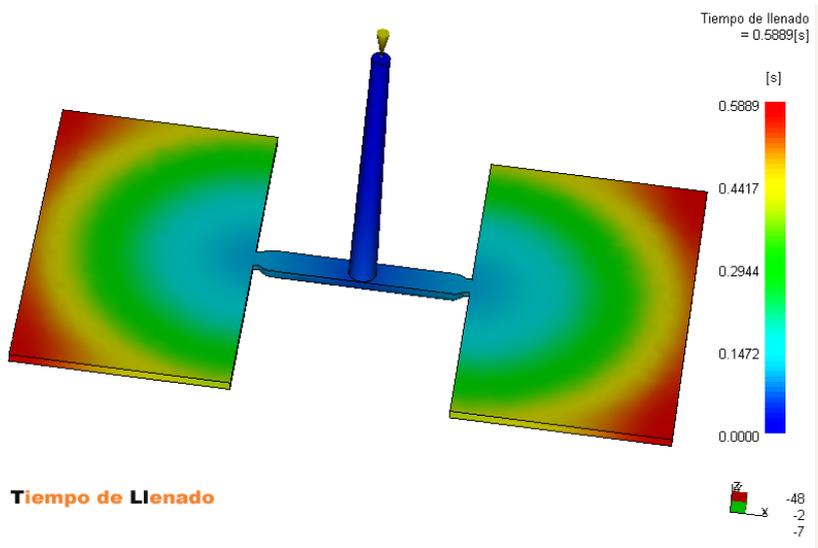
Índice de fluidez (MFR)

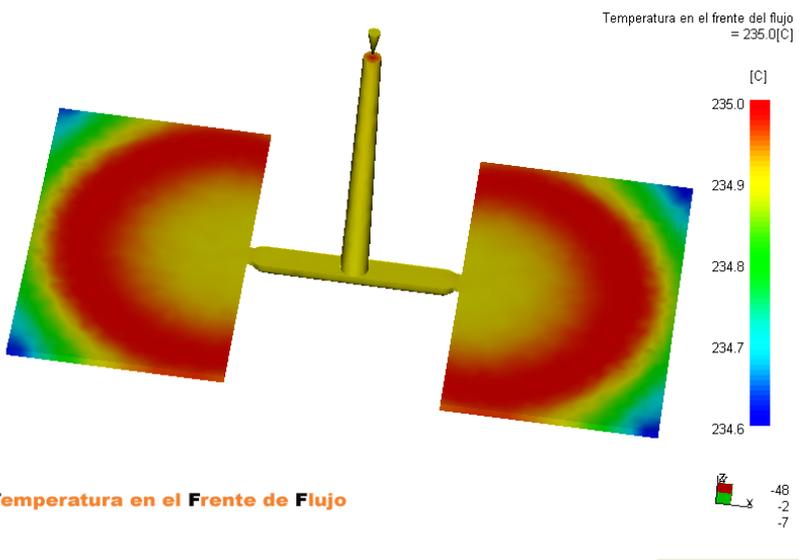
Temperatura C

Carga Kg

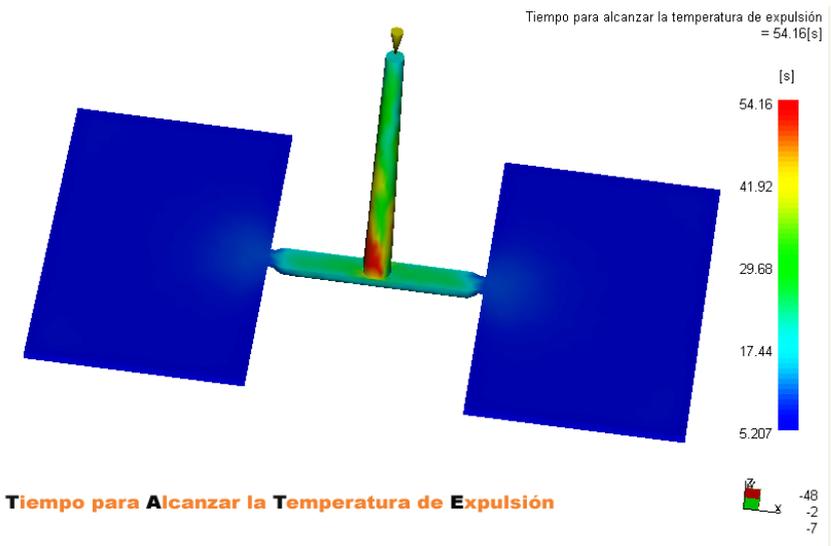
MFR medida g/10min

12.2. IMÁGENES DE LA PIEZA 03 Y DE LA SERIE B (1,5 MM)



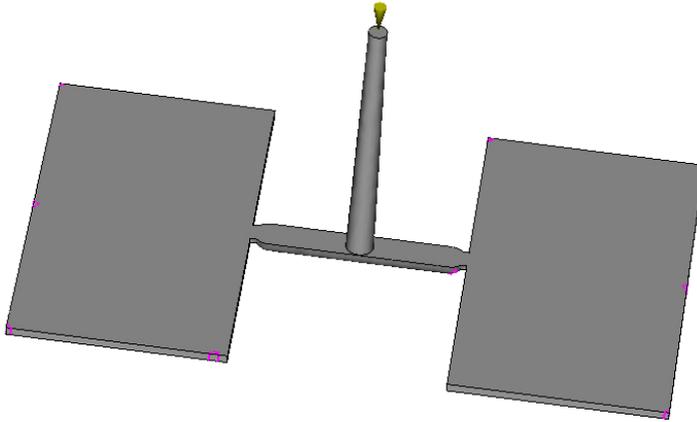


Temperatura en el Frente de Flujo



Tiempo para Alcanzar la Temperatura de Expulsión

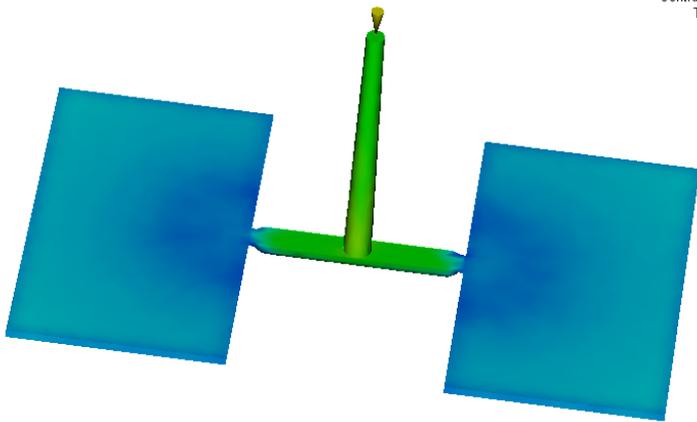
Atrapamientos de aire



Atrapamiento de Aire

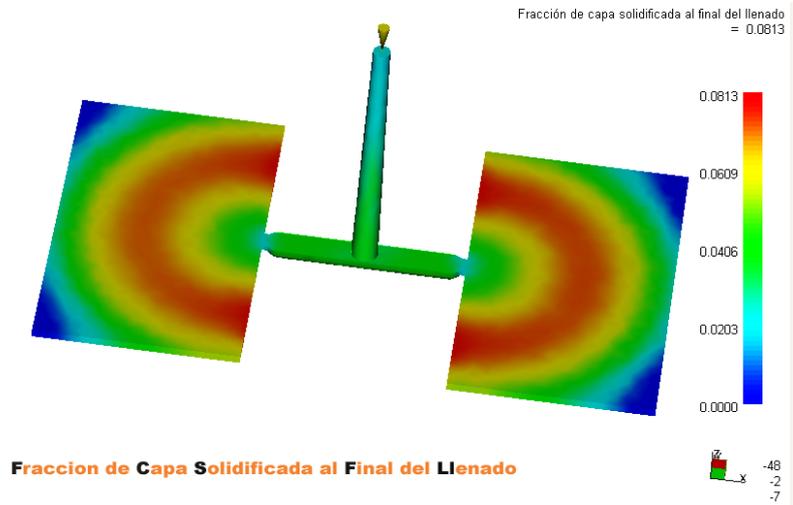
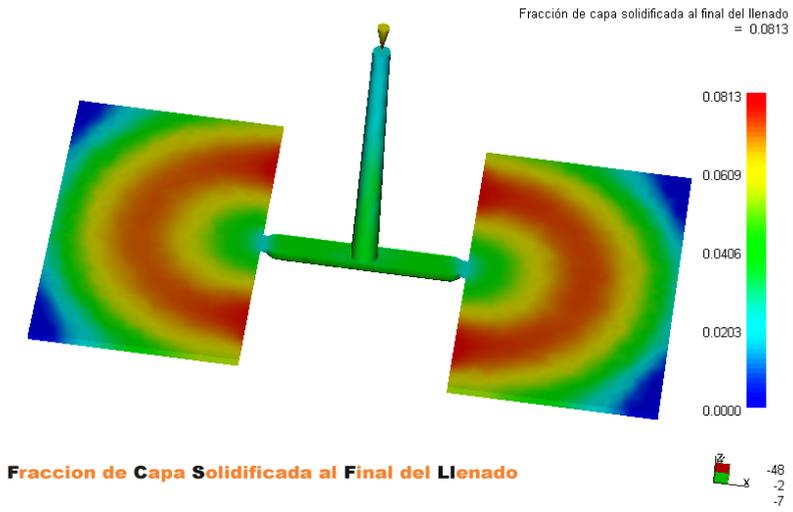


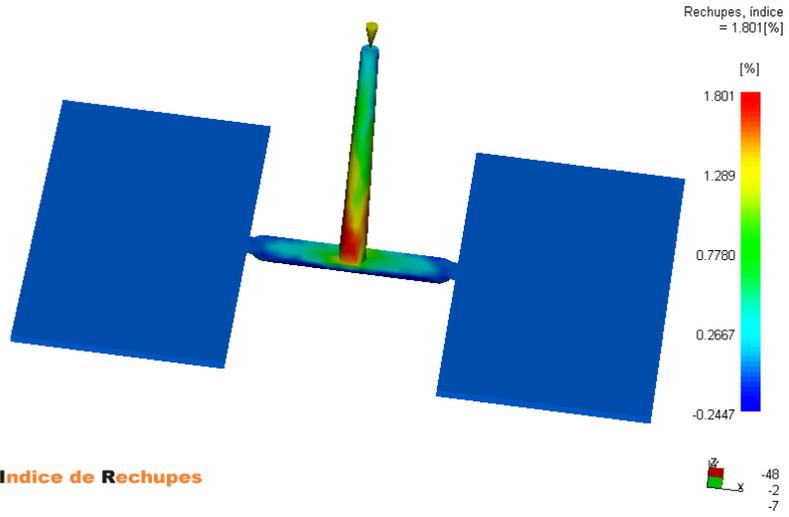
Contracción volumétrica
Tiempo = 11.20[s]



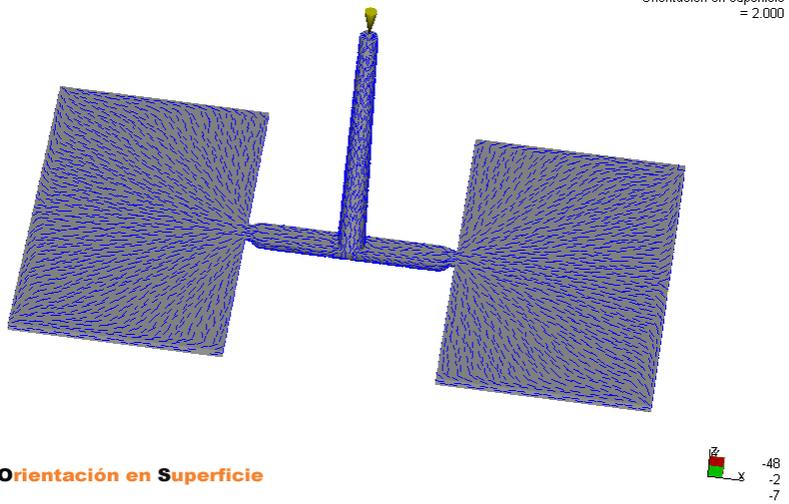
Contracción Volumétrica



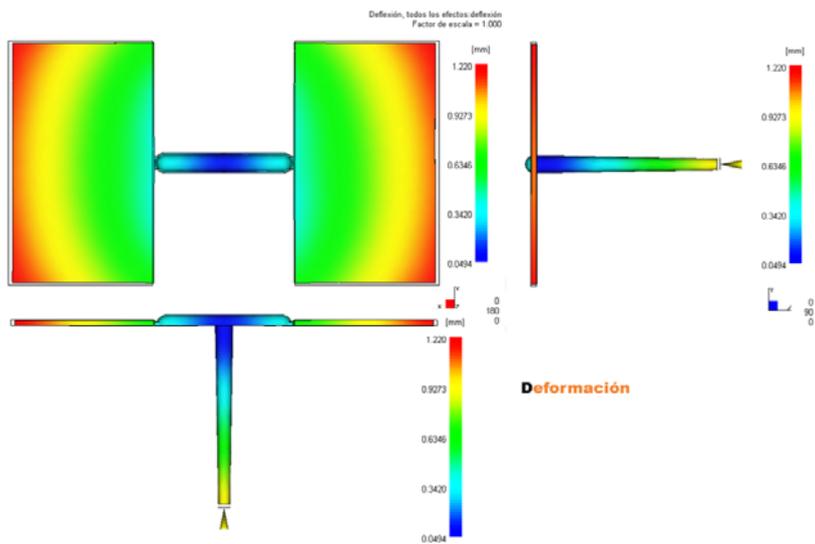




Indice de Rechupes



Orientación en Superficie



Apéndices

Índice de Figuras

Figura 1: Escenarios propuestos por SolidWorks	47
Figura 2: Menú inicial estudio de diseño de SolidWorks	47
Figura 3: Gráfica para el cálculo del diámetro del bebedero	48
Figura 4: Selección de la sección del bebedero.....	49
Figura 5: Dimensiones entrada de material	50
Figura 6: Forma final del bebedero.....	50
Figura 7: Ventana de procesos (valor mínimo)	58
Figura 8: Ventana de procesos (tiempo máximo)	58
Figura 9: Tiempo de inyección recomendado por MoldFlow.....	59
Figura 10: Esfuerzo de cizalla (MoldFlow)	59
Figura 11: Comportamiento de la presión de compactación en la curva de presiones	67
Figura 12: Tiempo de enfriamiento de la entrada de material.....	71
Figura 13: Tiempo para alcanzar la temperatura de extracción.....	72
Figura 14: Superficie respuesta de la presión de inyección.....	80
Figura 15: Pareto de influencia en la presión de inyección	81
Figura 16: Superficie respuesta de la fuerza de cierre.....	83
Figura 17: Pareto de influencia de la fuerza de cierre.	84
Figura 18: Superficie respuesta de la Temperatura al 95%.....	86
Figura 19: Pareto de influencia para la temperatura 95%.	87
Figura 20: Superficie respuesta para la tensión de cizalla.....	90
Figura 21. Superficie respuesta de la velocidad de cizalla.	94
Figura 22: Superficie respuesta de la diferencia en la temperatura en la masa	98
Figura 23: Tiempo de expulsión de las piezas sin el bebedero	102
Figura 24: Superficie respuesta para el tiempo de expulsión de la pieza.	103
Figura 25: Localización de la máxima presión y el pico máximo de presión	106
Figura 26: Grafico X-Y para la presión en la pieza.....	107
Figura 27: Superficie respuesta para la diferencia de presiones.	110
Figura 28: Superficie de respuesta para la fuerza de cierre en la compactación.....	114
Figura 29: Deflexión de la pieza X-Y-Z.....	115
Figura 30: Superficie respuesta de la deformación.....	117
Figura 31: Superficie respuesta para la contracción volumétrica.	119
Figura 32: Rectángulo áureo.....	132
Figura 33: Proporciones de la pieza 03.....	132
Figura 34: Superposición de rectángulo áureo con la proporciones del a pieza 03A.....	132
Figura 35: Fuerza de la Influencia de las distintas variables en la inyección de la pieza.	135

Índice de Gráficas

Gráfica 1: diagrama de barras para la keyword "injection moulding"	24
Gráfica 2: Diagrama de barras para la Keyword "optimization"	24
Gráfica 3: diagrama de barras para la Keyword "Thickness"	25
Gráfica 4: diagrama de barras para la keyword "response surface"	25
Gráfica 5: Diagrama de barras para keyword " MoldFlow"	26
Gráfica 6: Diagrama de barras para Keyword "Part geometry"	26
Gráfica 7: diagrama de barras para keyword "Defects"	27
Gráfica 8. Diagrama de barras para Keyword "Part dimension"	27
Gráfica 9: Variación de viscosidad con la velocidad de cizalla	40
Gráfica 10: Variables en la fase de llenado para los tiempos de llenado de la Serie B	60
Gráfica 11: Tensión de cizalla a distintas temperaturas de fundido.	63
Gráfica 12: Tiempo para expulsión a distintas temperaturas de fundido.	63
Gráfica 13: Diferencia en la temperatura de flujo para las temperaturas de fundido.	64
Gráfica 14: Presión de inyección para las temperaturas de fundido	64
Gráfica 16: Velocidad de cizalla para las temperaturas de fundido.	65
Gráfica 15: Fuerza de cierre para la temperatura de fundido	65
Gráfica 17: diferencias de presiones máximas para las distintas presiones de compactación.	68
Gráfica 18: Deformación con las distintas presiones de compactación.	70
Gráfica 19: Tiempo de llenado para las distintas presiones de compactación.	71
Gráfica 20: Tiempo de solidificación de la entrada para cada serie.....	73
Gráfica 21: Presión de inyección en la fase de llenado	79
Gráfica 22: Gráfico de dispersión de la presión de inyección.....	80
Gráfica 23: Fuerza de cierre para la fase de llenado	81
Gráfica 24: Gráfico de dispersión presión de inyección y fuerza de cierre.	82
Gráfica 25: Gráfico de correlación lineal de la fuerza de cierre.	83
Gráfica 26: Temperatura del 95% del flujo en la fase de llenado.	84
Gráfica 27: Gráfico de correlación lineal de la temperatura 95%	85
Gráfica 28: Dispersión para la variable de la Temperatura al 95%.....	86
Gráfica 29: Tensión de cizalla para la fase de llenado.	87
Gráfica 30: Correlación de tensión de cizalla para la serie C	88
Gráfica 31: Correlación Lineal para la tensión de cizalla en la serie B.....	88
Gráfica 33: Medias de la tensión de cizalla por serie.	89
Gráfica 32: Correlación lineal de la tensión de cizalla para la serie A	89
Gráfica 34: Pareto de influencia en la tensión de cizalla.	91
Gráfica 35: Velocidad de cizalla en la fase de llenado.	91
Gráfica 36: Coeficiente de correlación de la velocidad de cizalla para la serie A.....	92
Gráfica 37: Coeficiente de correlación de la Velocidad de cizalla para la Serie B	92
Gráfica 38: Coeficiente de correlación para la velocidad de cizalla para la serie C.....	92

Gráfica 39: Promedios por serie de la velocidad de cizalla.....	93
Gráfica 40: Desviación estándar para la velocidad de cizalla.....	93
Gráfica 41: Pareto de influencia de la velocidad de cizalla.....	95
Gráfica 42: Diferencia de temperatura en masa tras el llenado.....	95
Gráfica 43: Promedios de temperatura en masa.....	96
Gráfica 44: Coeficiente de correlación de la temperatura en masa serie A.....	96
Gráfica 45: Coeficiente de correlación de la diferencia de la temperatura en masa serie B.....	97
Gráfica 46: Coeficiente de correlación de la diferencia en la temperatura en masa de la serie C.....	97
Gráfica 47: Pareto de influencia en la diferencia de la temperatura en la masa.....	98
Gráfica 48: Tiempo para la expulsión de la pieza en la fase de llenado.....	99
Gráfica 49: Promedios del tiempo de expulsión de la pieza para las tres series.....	100
Gráfica 50: Coeficiente de correlación del tiempo de expulsión de la pieza en la serie A.....	100
Gráfica 51: Coeficiente de correlación para el tiempo de expulsión de la pieza en la serie B.....	101
Gráfica 52: Coeficiente de correlación del tiempo de expulsión de la pieza en la serie C.....	101
Gráfica 53: Tiempo de expulsión para la pieza.....	103
Gráfica 54: Pareto de influencia para el tiempo de expulsión de la pieza.....	104
Gráfica 55: Máxima presión en la pieza.....	107
Gráfica 56: Pico máximo de presión.....	107
Gráfica 57: Diferencia entre máxima presión y pico máximo de presión en pieza.....	108
Gráfica 58: Promedios de las diferencias entre la presión máxima y el pico máximo de presión.....	108
Gráfica 59: Coeficiente de correlación para la diferencia en las presión en la pieza en todas las series.....	109
Gráfica 60: Coeficiente de correlación en la diferencia de presiones en pieza en la serie A.....	109
Gráfica 61: Coeficiente de correlación de la diferencia entre presiones en la pieza de la serie B.....	109
Gráfica 62: Coeficiente de correlación para la diferencia de presiones en pieza en la serie C.....	110
Gráfica 63: Pareto de influencia para la diferencia de presiones.....	111
Gráfica 64: Fuerza de cierre en la compactación.....	111
Gráfica 65: Coeficiente de correlación en la fuerza de cierre para la compactación.....	112
Gráfica 66: Relación fuerza de cierre en compactación con la presión máxima de inyección en compactación.....	112
Gráfica 67: Promedios de la fuerza de cierre para las distintas series.....	113
Gráfica 68: Coeficiente de correlación de la fuerza de cierre en la compactación serie A.....	113
Gráfica 69: Coeficiente de correlación para la fuerza de cierre en compactación en serie B.....	113
Gráfica 70: Coeficiente de correlación de la fuerza de cierre en la compactación en la serie C.....	114
Gráfica 71: Pareto de influencia para la fuerza de cierre en la compactación.....	115
Gráfica 72 : Deformación de la pieza.....	116
Gráfica 73: Promedios de la deformación para las distintas series.....	116
Gráfica 74: Coeficiente de correlación para la deformación y la relación A/B.....	117
Gráfica 75: Pareto de influencia para la deformación.....	118
Gráfica 76: Contracción volumétrica.....	118
Gráfica 77: Pareto de influencia para la contracción volumétrica.....	119

Índice de tablas.

Tabla 1: Propiedades del Polipropileno (PP).....	45
Tabla 2: Volúmenes de las distintas series	48
Tabla 3: Datos definitivos de la serie A	51
Tabla 4: Datos definitivos de la serie B	52
Tabla 5: Datos definitivos de la serie C	53
Tabla 6: Tiempos de llenado para análisis.....	59
Tabla 7: Valores de las variables independientes en la fase de llenado para los tiempos de llenado obtenidos en la serie A.....	59
Tabla 8: Valores obtenidos de las variables de llenado con los tiempos de llenado de la serie B	60
Tabla 9: Valores obtenidos de las variables de la fase de llenado con los tiempos de llenado obtenidos en la serie C ..	61
Tabla 10: Tiempo de llenado definitivo para cada serie.....	62
Tabla 11: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie A.....	62
Tabla 12: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie B	62
Tabla 13: Valores de las variables de la fase de llenado para los valores de la temperatura de fundido Serie C	63
Tabla 14: Variables en fase de compactación para las distintas presiones de compactación.....	70
Tabla 15: Datos definitivos de llenado y compactación	73
Tabla 16: Resultados obtenidos en al fase de Llenado	78
Tabla 17: Desviación estándar de la tensión de cizalla en cada serie.....	90
Tabla 18: Variables a considerar en la fase de compactación	104
Tabla 19: Resultados obtenidos en la fase de Compactación	105
Tabla 20: Tabla de dependencia entre las variables y el espesor.....	123
Tabla 21: Matriz de prioridades para las tres series (espesores).....	124
Tabla 22: Tabla de dependencia entre las variables y la relación A/B	125
Tabla 23: Matriz de prioridades para la relación A/B, teniendo en cuenta todas las variables.....	126
Tabla 24: Matriz de prioridades para la relación A/B descartando las variables que no influyen sobre la relación A/B para la serie A.....	126
Tabla 25: Matriz de prioridades para la relación A/B excluyendo las variables que no influyen serie B.....	127
Tabla 26: Matriz de prioridades para la relación A/B sin tener en cuenta las variables que no influyen sobre la relación A/B serie C.....	128
Tabla 27: Resumen de las piezas que mejor se inyectan.....	128