

2014



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“PARAMETRIZACIÓN DEL
PROCESO DE INYECCIÓN EN
PLÁSTICOS DE INGENIERÍA”**

T E S I S

Q U E P A R A O B T E N E R E L
T I T U L O D E
I N G E N I E R O M E C Á N I C O

P R E S E N T A :

P E D R O A R E N A S P I Ñ A

DIRECTORA: DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGÁN.

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2014, MÉXICO DISTRITO FEDERAL.

Agradecimientos.

A mis padres Olivia Piña y Miguel Arenas, por darme su apoyo incondicional para la culminación de este proyecto de mi vida.

A mi hermano Miguel Arenas, por su amistad incondicional.

A mi gran familia Piña, que su ejemplo y aliento que me ayudaron a terminar mi carrera.

Al M.I. Miguel Ángel Cruz, por compartirme de sus conocimientos, además de proporcionarme de las herramientas necesarias para poder llevar a cabo ésta tesis.

A todos mis amigos (no los menciono a todos por que fueron muchos) que indirectamente o directamente me alentaron a terminar la tesis.

Y en especial a la Dr. Magdalena Trujillo, porque me tuvo paciencia, que tuvimos muchas tardes de discusión, muchas tardes de alegrías y que además de ser mi asesora de tesis, es mi mejor amiga.

A todos ellos muchas gracias...

Índice.

| | Página |
|--|---------------|
| Introducción. | 2 |
| Objetivos e Hipótesis | 3 |
| Capítulo 1 Antecedentes | 4 |
| Capítulo 2 Descripción de los Acetales, características y propiedades | 20 |
| Capítulo 3 Descripción del proceso de inyección | 30 |
| Capítulo 4 Alternativas para la optimización de un proceso de inyección. | 47 |
| Capítulo 5 Protocolo de optimización del proceso. | 95 |
| Conclusiones. | 97 |
| Bibliografía | 98 |

Introducción.

El proceso de inyección de plásticos es uno de los procesos más importantes para la elaboración de piezas de plástico de alta producción, que generalmente son elementos ensamblados con otras piezas del mismo y/o diferente material, de ahí la importancia de tener un proceso bien controlado para tener piezas conforme a tolerancias de calidad de las empresas, como por ejemplo apariencia, dimensiones, propiedades mecánicas, térmicas, etc.

En el proceso antes citado se involucran una gran cantidad de variables como son presión de inyección, velocidad de inyección, temperatura del molde, temperatura de la masa, presión posterior, etc., y por ende una infinidad de soluciones para diferentes problemas que presentan las piezas es por ello en éste trabajo fue realizado para dar a conocer los diferentes formas de optimizar el proceso de inyección de plástico comenzando por la forma empírica o tradicional, posteriormente la aplicación del programa computacional del mold flow y por último el moldeo científico, hasta el planteamiento de un protocolo que sirve para optimizar el proceso con una serie de pasos que al llevarlos a cabo se puede identificar las variables que afectan al proceso con bases matemáticas.

El protocolo tiene como fin sustituir la manera tradicional como se inyecta plástico a una manera más ingenieril y formal para identificar los problemas y aciertos de cada toma de decisión durante la optimización, arranque de moldes nuevos y/o cambio de material para utilizar el mismo molde.

Objetivos

Utilizar el proceso de inyección de plástico basado en la experiencia laboral, para la fabricación de piezas con alta calidad. Las piezas serán evaluadas para determinar la influencia del proceso de inyección con la calidad de las mismas. .

Determinar los parámetros de inyección mediante la conjunción de alternativas existentes para el proceso, como el uso del programa computacional mold flow en el llenado de piezas de plástico.

Se propondrá un protocolo para el manejo de los parámetros del proceso de inyección, que permita dar una mayor eficiencia al proceso de inyección a la par de cuidar la buena calidad de las piezas

Hipótesis

Los parámetros de un proceso de inyección de plásticos se ajustan de manera empírica desde los inicios de este moldeo de manufactura; esto se debe a la complejidad en el manejo de la cantidad de variables que intervienen, así como también en la necesidad de disminuir los tiempos de producción. Por ello, es necesario emplear un protocolo que dirija de manera sistematizada los ajustes del proceso de tal manera que pueda tenerse una repetitividad confiable en los pasos a seguir para un molde, una máquina y un material determinados.

CAPÍTULO 1

Antecedentes

¿En que pensamos cuando decimos o escuchamos la palabra plástico? Hace cien años, al mencionar el término plástico, éste se podía entender como algo relativo a la reproducción de formas o las artes plásticas, la pintura, la escultura, el moldeado. En la actualidad, esta palabra se utiliza con mayor frecuencia y tiene un significado que implica no sólo arte, sino también tecnología y ciencia.

PLASTICOS es una palabra que deriva del griego "Plastikos" que significa "Capaz de ser Moldeado", sin embargo, esta definición no es suficiente para describir de forma clara a la gran variedad de materiales que así se denominan. Técnicamente los plásticos son sustancias de origen orgánico formadas por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno principalmente. Se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural. Es posible moldearlos mediante procesos de transformación aplicando calor y presión [6].

Los plásticos son parte de la gran familia de los Polímeros. El polímeros es una palabra de origen latín que significa Poli = muchas y meros = partes, de los cuales se derivan también otros productos como los adhesivos, recubrimientos y pinturas [6].

En la época actual resultaría difícil imaginar que alguno de los sectores de nuestra vida diaria, de la economía o de la técnica, pudiera prescindir de los plásticos. Sólo basta con observar a nuestro alrededor y analizar cuántos objetos son de plástico para visualizar la importancia económica que tienen estos materiales.

Dicha importancia se refleja en los índices de crecimiento que, mantenidos a lo largo de algunos años desde principios de siglo, superan a casi todas las demás actividades industriales y grupos de materiales. El consumo mundial de plástico superará los 300 millones de toneladas en 2010, afirmó en Lisboa el presidente de la sección ibérica de la Asociación Europea de Productores Plásticos (PlasticsEurope), Esteban Gimeno. Explicó que en 2006 la cifra alcanzó los 250 millones de toneladas -de las cuales el 25 por ciento correspondió a Europa. (Fuente: www.eleconomista.es, nota del 10 de oct de 2007. Y consultado el 26 de noviembre de 2011.)

El consumo de plásticos sólo se encuentra por abajo del consumo del hierro y acero, pero debe tomarse en cuenta que estos tienen una densidad entre seis y siete veces mayor a la de los plásticos. Por esta razón, se dice que el volumen producido de plásticos fue mayor al del acero.

Los plásticos seguirán creciendo en consumo pues han abarcando el mercado del vidrio, papel y metales debido a sus buenas propiedades y su relación costo-beneficio. Con base en los datos, México debe cambiar para ya no ser sólo un exportador de petróleo. Aunque este recurso es un buen negocio en el presente, si se agrega valor, se convierte en un negocio más interesante.

Actualmente, México es el cuarto productor mundial de petróleo, con alrededor de un millón de barriles diarios. Esta producción podría alcanzar mayores utilidades convirtiéndose en productos petroquímicos y plásticos. Es decir, al invertir un millón de pesos en la extracción de petróleo se obtienen 800 mil pesos de utilidad. Invertir esa misma cantidad en Petroquímicos genera 1.2 millones de pesos y al hacerlo en la transformación de plásticos se podrían obtener 15 millones de pesos. En la gráfica siguiente, se puede apreciar con mayor detalle el consumo de termoplásticos de ingeniería y su crecimiento a través de los años. Podemos observar que, principalmente Estados Unidos y Europa llevan desde 1994 el liderazgo en el consumo de estos materiales; sin embargo, desde el inicio del presente siglo, China está siendo competitiva con los anteriores.

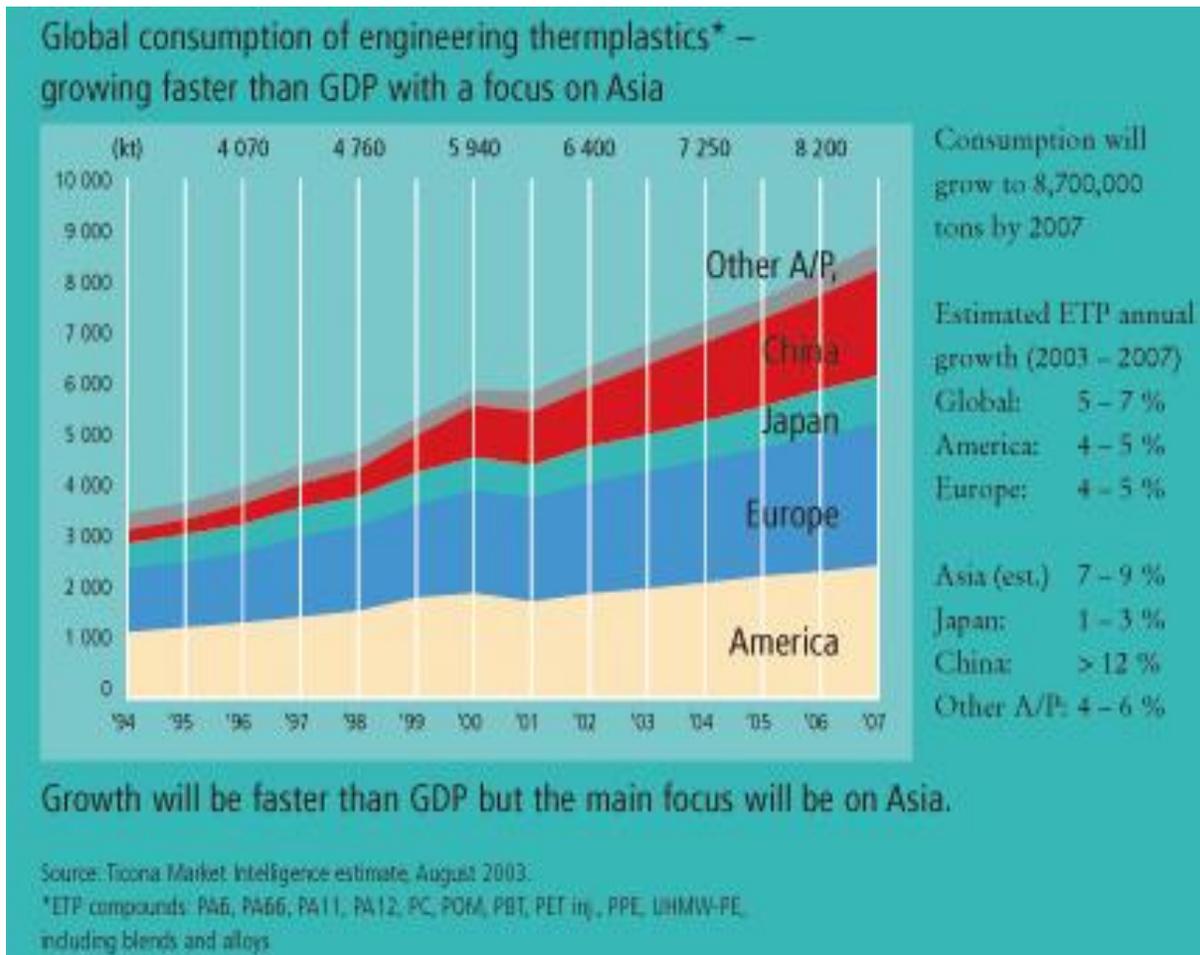


Figura 1.1 Índices de consumo de plásticos de ingeniería a nivel mundial. Fuente: www.ticona.com

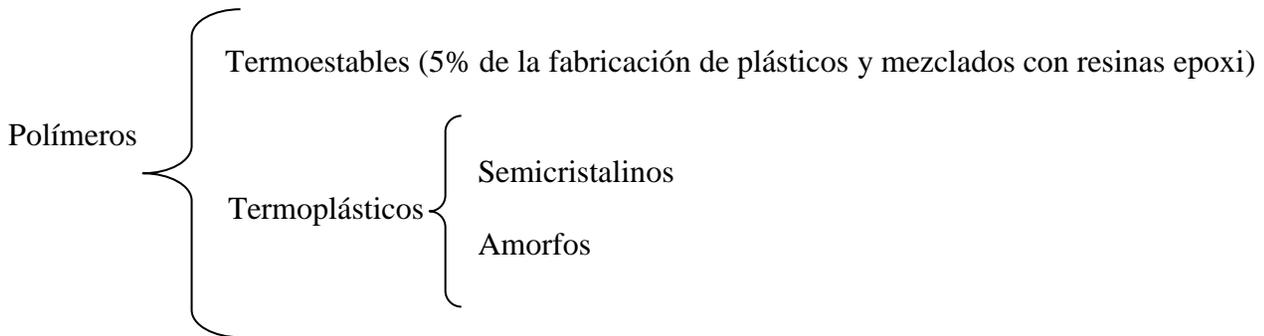
Esta es una de las razones del porqué los países industrializados, a pesar de no contar con petróleo tiene altos ingresos de divisas.

En términos generales y retomando las definiciones antes mencionadas, los polímeros se crean bajo la unión de cadenas de moléculas llamadas meros el cual en su composición son en gran parte de hidrogeno y carbono y en alguno de sus enlaces contienen otro tipo de átomo ó molécula.

Como se mencionó, estos materiales son en la actualidad de valor imprescindible en la vida cotidiana debido a su amplia variedad de usos en todos los ámbitos. Actualmente son materiales insustituibles en sus diversas aplicaciones. Debido a esto se busca la mejora del procesamiento del plástico.

Los polímeros han logrado sustituir otros materiales como son madera, metales, fibras naturales, cerámicas y hasta piedras preciosas. Es por eso que los plásticos en ingeniería juegan un papel muy importante en el mundo de hoy en día, estos cada vez más se apoderan de nuestros hogares, de nuestra industria, en fin de todo lo que nos rodea, dado que cada vez más estos materiales cumplen con propiedades exigentes.

Hay diversas clasificaciones de los polímeros, entre las que podemos mencionar están:



Termoplásticos semicristalinos

- Este tipo de materiales se caracterizan por enlazarse muy ordenadamente, es decir las cadenas poliméricas pueden unirse por segmentos a través de las fuerzas de Van der Waals, con ello se logra un empaquetamiento muy ordenado, llamado cristalización; sin embargo, la cristalinidad no se da en la totalidad del producto por efecto del ángulo entre carbono y carbono, de ahí el nombre de semicristalino [6].

Termoplásticos amorfos

- Es todo lo contrario a los semicristalinos, las cadenas no mantienen ningún orden aparente durante su enfriamiento, muchas veces debido a grupos de metilo insertados a lo largo de la cadena, lo que impide que las fuerzas de Van der Waals actúen.

Entre sus principales características de ambos termoplásticos tenemos:

| Amorfos | Semicristalinos |
|--------------------------------|---|
| Normalmente transparentes | Opacos |
| Resistencia mecánica media | Resistencia mecánica alta |
| Poca resistencia a la fatiga | |
| Temperatura de fusión definida | Intervalo de fusión muy definido y estrecho (3-4°C) |
| Bajas contracciones de moldeo | Altas contracciones de moldeo |

Tabla 1.1.- Características de los termoplásticos. [9]

Lo que nos lleva a pensar en una amplia gama de posibilidades de uso de estos materiales. A partir de ellos, y de acuerdo con el tipo de artículo que se desea elaborar se emplean distintos procesamientos de fabricación, donde se puede observar que el común denominador es el control tanto de la temperatura como de la presión, se tiene, entre los diversos procesos:

- **Moldeo por inyección:** En este proceso, bajo calor y presión y con la ayuda de un husillo, se da forma al producto terminado. Siendo el tema de proceso de inyección el propósito de este trabajo, más adelante se dará mayor detalle de las características y pasos para la utilización de la máquina de inyección.
- **Moldeo por extrusión:** En el moldeo por extrusión se utiliza un transportador de tornillo helicoidal (husillo). El polímero es transportado desde la tolva, a través de la cámara de calentamiento, hasta el dado de descarga, en una corriente continua. A partir de granulos sólidos, el polímero emerge de la matriz de extrusión en un estado blando. Como la abertura del dado de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada.
- **Moldeo por soplado:** Es un proceso secundario usado para hacer formas huecas (botellas, recipientes). Un cilindro plástico de paredes delgadas es extruido y luego cortado en el largo que se desea. Luego el cilindro se coloca en un molde que se cierra sobre el polímero ablandado y le suprime su parte inferior cortándola. Una corriente de aire o vapor es insuflado por el otro extremo y expande el material hasta llenar la cavidad. Sin embargo, este proceso también secunda al de inyección, cuando previamente se inyecta una preforma.
- **Moldeo por vacío:** Mediante este proceso se comprime una chapa de resina termoplástica ablandada por el calor contra un molde frío. La chapa toma y conserva la forma del molde. Este método se emplea para revestimientos interiores (puertas de heladeras, gabinetes, etc.)
- **Calandrado:** El proceso se emplea para la fabricación de chapas y películas plásticas. Consiste en pasar un polímero convertido en una masa blanda entre una serie de rodillos calentados. A medida que el polímero pasa a través de los rodillos se forma un producto uniforme. El último par de rodillos se ajustan para dar el espesor deseado. El sistema de rodillos de enfriamiento da a las chapas o películas su estructura molecular permanente.[9]

Moldeo por inyección

Un émbolo o pistón de inyección se mueve rápidamente hacia adelante y hacia atrás para empujar el plástico ablandado por el calor a través del espacio existente entre las paredes del cilindro y una pieza recalentada y situada en el centro de aquél. Esta pieza central se emplea, dada la pequeña conductividad térmica de los plásticos, de forma que la superficie de calefacción del cilindro es grande y el espesor de la capa plástica calentada es pequeño. Bajo la acción combinada del calor y la presión ejercida por el pistón de inyección, el polímero es lo bastante fluido como para llegar al molde frío donde toma forma la pieza en cuestión. El polímero estará lo suficientemente fluido como para llenar al molde frío, pero sin que éste se derrame a través de la línea de partición. Pasado un tiempo breve dentro del molde cerrado, el plástico solidifica, el molde se abre y la pieza es removida. El ritmo de producción es muy rápido, en el orden de segundos. Otras configuraciones de máquinas de inyección incluyen el uso de un husillo (o tornillo de

Arquímedes) que funciona como émbolo-pistón y dosificador para el llenado de la cámara delantera del cilindro.[9]

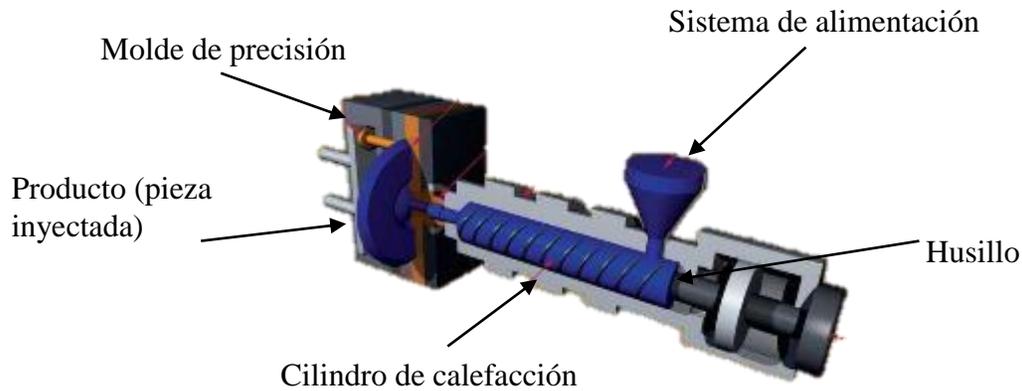


Figura 1.2.- Esquema del proceso de inyección.

Es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido (o ahulado) en un molde cerrado a presión y temperaturas controladas, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. En ese molde el material se solidifica, y comienza a cristalizar en el caso de polímeros semicristalinos. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

El moldeo por inyección es una de las tecnologías de procesamiento de plástico más famosas, ya que representa un modo relativamente simple de fabricar componentes con formas geométricas de alta complejidad. Para ello se necesita una máquina de inyección que incluya un molde. En este último, se fabrica una cavidad cuya forma y tamaño son idénticas a las de la pieza que se desea obtener. La cavidad se llena con plástico fundido, el cual se solidifica, manteniendo la forma moldeada.

Los polímeros conservan su forma tridimensional cuando son enfriados por debajo de su temperatura de transición vítrea (T_g) y, por tanto, también de su temperatura de fusión para polímeros semicristalinos. Los polímeros amorfos, cuya temperatura útil es inferior a su T_g , se encuentran en un estado termodinámico de pseudoequilibrio. En ese estado, los movimientos de rotación y de relajación (desenredo de las cadenas) del polímero están altamente frenados. Es por esta causa que, en ausencia de esfuerzos, se retiene la forma tridimensional. Los polímeros semicristalinos poseen, además, la característica de formar cristales. Estos cristales proporcionan estabilidad dimensional a la molécula, la cual también es —en la región cristalina— termodinámicamente estable. La entropía de las moléculas del plástico disminuye drásticamente debido al orden de las moléculas en los cristales.

Máquinas de Inyección

Según la norma DIN 24450 una inyectora es una máquina cuya tarea principal consiste en la fabricación discontinua de piezas a partir de masas de moldeo de elevado peso molecular, con la ayuda de presiones elevadas.

Una máquina inyectora es capaz de plastificar el material polimérico y bombearlo hacia un molde en donde llena una cavidad y adquiere la forma del producto deseado.

Están compuestas principalmente de tres partes características que son:

- Unidad de inyección
- Unidad de cierre
- Molde (este último independiente de la máquina pero adaptado a ella)
- Unidad del proceso de inyección (Ibed)
- Unidad de potencia

Unidad de inyección

La función principal de la unidad de inyección es la de fundir, mezclar e inyectar el polímero. Para lograr esto se utilizan husillos de diferentes características según el polímero que se desea fundir.

El proceso de fusión involucra un incremento en el calor del polímero, que resulta del aumento de temperatura y de la fricción entre el barril y el husillo. La fricción y esfuerzos cortantes son básicos para una fusión eficiente, dado que los polímeros no son buenos conductores de calor. Un incremento en temperatura disminuye la viscosidad del polímero fundido; lo mismo sucede al incrementar la velocidad de corte. Por ello ambos parámetros deben ser ajustados durante el proceso. Con algunas excepciones —como el PVC—, la mayoría de los plásticos pueden utilizarse en las mismas máquinas.

La unidad de inyección es en origen una máquina de extrusión con un sólo husillo, teniendo el barril calentadores y sensores para mantener una temperatura programada constante. La profundidad entre el canal y el husillo disminuye gradual (o drásticamente, en aplicaciones especiales) desde la zona de alimentación hasta la zona de dosificación. De esta manera, la presión en el barril aumenta gradualmente. El esfuerzo mecánico, de corte y la compresión añaden calor al sistema y funden el polímero más eficientemente que si hubiera únicamente calor, siendo ésta la razón fundamental por la cual se utiliza un husillo.

Una diferencia sustancial con respecto al proceso de extrusión es la existencia de una parte extra llamada cámara de reserva (cojín de masa). Es allí donde se acumula el polímero fundido para ser inyectado. Esta cámara actúa como la de un pistón; toda la unidad se comporta como el émbolo que empuja el material. Debido a esto, una parte del husillo termina por subutilizarse, por lo que se recomiendan barriles largos para procesos de mezclado eficiente. Tanto en inyección como en extrusión se deben tomar en cuenta las relaciones de Presión, volumen, temperatura (PVT), que ayudan a entender cómo se comporta un polímero al fundir.

Unidad de cierre

Es una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre bastante grande que contrarresta la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa, que sólo se encuentran en el planeta de forma natural únicamente en los puntos más profundos del océano.

Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material escapará por la unión del molde, causando así que la pieza final tenga defectos de rebabas. Es común utilizar el área proyectada de una pieza (área que representa perpendicularmente a la unidad de cierre el total de la cavidad) para determinar la fuerza de cierre requerida:

$$F = P_m \times A_p$$

Dónde:

F = Fuerza (N)

P_m = Presión media (Pa)

A_p = Área proyectada (m²)

Molde

El molde (también llamado herramienta) es la parte más importante de la máquina de inyección, ya que es el espacio donde se genera la pieza; para fabricar un producto diferente, simplemente se cambia el molde, al ser una pieza intercambiable que se atornilla en la unidad de cierre.

Las partes del molde son:

- Cavidad: Es el volumen en el cual la pieza será moldeada.
- Canales o ductos: Son conductos a través de los cuales el polímero fundido fluye debido a la presión de inyección. El canal de alimentación se llena a través de la boquilla, los siguientes canales son los denominados bebederos y finalmente se encuentra la compuerta (o punto de inyección).
- Canales de enfriamiento: Son canales por los cuales circula agua para regular la temperatura del molde. Su diseño es complejo y específico para cada pieza y molde, ya que de un correcto enfriamiento depende que la pieza no se deforme debido a contracciones irregulares.
- Barras expulsoras: Al abrir el molde, estas barras expulsan la pieza moldeada fuera de la cavidad, pudiendo a veces contar con la ayuda de un robot para realizar esta operación.[9]

Unidad del proceso de control

Este sistema básicamente contiene un controlador lógico programable (PLC) y controladores PID para las resistencias eléctricas del barril y de la boquilla. El PLC permite programar la secuencia del ciclo de inyección y recibe señales de alarma, por sobrepresión o finales de carrera,

para detener el ciclo. Los controles PID son los más adecuados para el control de temperatura debido a su elevada velocidad de respuesta para mantener la temperatura a los niveles requeridos.

Unidad de potencia

Sistemas de potencia hidráulicos: Los motores hidráulicos son los más comúnmente utilizados, su funcionamiento se basa en la transformación de la potencia hidráulica del fluido en potencia mecánica.

A diferencia de los sistemas electromecánicos, donde la potencia es transmitida a través de engranes y palancas, en un sistema con fluidos estos elementos se sustituyen total o parcialmente, por tuberías de conducción que llevan el fluido a presión a los pistones de inyección y de cierre del molde. En los sistemas hidráulicos es común utilizar presiones que varían entre los 70 y 140 Kg/cm². Las ventajas del motor hidráulico con respecto al eléctrico pueden resumirse principalmente en:

- Fácil variación de velocidad, regulando el volumen del fluido
- Permite arranques y paradas rápidos debido al pequeño momento de inercia
- Permite relaciones bajas de peso potencia, lo que posibilita alcanzar altas velocidades de inyección del material[9].

Especificaciones de una inyectora

Las principales características utilizadas para dimensionar y comparar máquinas inyectoras son:

- Capacidad o fuerza de cierre: usualmente se da en toneladas (ton)
- Capacidad de inyección: es el volumen de material que es capaz de suministrar a la máquina en una inyección (cm³/inyección)
- Presión de inyección: es la presión máxima a la que puede bombear la unidad de inyección el material hacia el molde.
- Capacidad de plastificación: es la cantidad máxima de material que es capaz de suministrar el husillo, por hora, cuando plastifica el material
- Velocidad de inyección: es la velocidad máxima a la cual puede suministrar la unidad de inyección el material hacia el molde

Ciclo de moldeo

En el ciclo de moldeo se distinguen 6 pasos principales (aunque algunos autores llegan a distinguir hasta 9 pasos):

- 1. Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.

- 2. Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y, con el husillo que actúa como un pistón, se hace pasar el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
- 3. La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse tiende a contraerse.
- 4. La presión se elimina. La válvula se cierra y el husillo gira para cargar material; al girar también retrocede.
- 5. La pieza en el molde termina de enfriarse (este tiempo es el más caro pues es largo e interrumpe el proceso continuo), la prensa libera la presión y el molde se abre; las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad.
- 6. La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo puede reiniciarse.[9]

Duración del ciclo de inyección

El tiempo que tarda un ciclo de inyección, permite establecer el costo y rentabilidad de una producción. El cierre y apertura del molde consume el mismo tiempo. La suma de estas etapas es el tiempo de ciclo en vacío, que es una constante de la máquina y la indica el fabricante; de igual manera, el fabricante señala el número máximo de ciclos en vacío por minuto. El tiempo total del ciclo se compone de:

- Tiempo en vacío (t_v)
- Tiempo de inyección (t_i)
- Tiempo de aplicación de la presión de sostenimiento (t_p)
- Tiempo de plastificación (t_f)
- Tiempo de solidificación o enfriamiento (t_s)

Control de parámetros

PVT (relaciones de presión-volumen-temperatura)

En cualquier polímero, las relaciones entre presión, volumen y temperatura son muy importantes para obtener un proceso de inyección eficiente, ya que el volumen específico de un polímero aumenta al ascender la temperatura del mismo. Entre estas dos dimensiones se presentan curvas isobáricas por las cuales se guía el polímero. El comportamiento de los polímeros amorfos y semicristalinos en el paso de enfriamiento es muy diferente, lo que debe tomarse en cuenta si se quiere obtener una pieza de alta calidad.

Para diseño de equipo de proceso es necesario conocer las relaciones de PVT de los polímeros que se utilizarán, en su forma final, es decir aditivados. A continuación se mencionan los parámetros más comunes para el inicio de las relaciones de PVT, basados en la ecuación de Flory:

α = Coeficiente de expansión térmica

β = Compresibilidad isotérmica

Y una ecuación empírica es:

Cuando

Las relaciones de PvT se utilizan en ingeniería de polímeros para lograr un sistema técnico que, basado en la teoría molecular, proporcione datos aplicados a los polímeros en estado fundido en un amplio intervalo de presión y temperatura. Esto se logra con datos empíricos concretos y limitados.

Cristalización y deformación de la pieza al enfriarse (contracción)

Debe tenerse en cuenta que la razón de este fenómeno se debe al cambio de densidad del material, que sigue un propio comportamiento fisicoquímico, particular para cada polímero, y que puede ser isotrópico o anisotrópico.

De acuerdo con las relaciones de PVT anteriores, se infiere que la parte moldeada sufrirá una contracción, presentando cada polímero diferentes tipos de contracción; sin embargo, puede decirse que, en general, siguen las mismas ecuaciones para contracción isotrópica:

Dónde:

L_c = longitud de la cavidad

L_{mp} = longitud de la parte moldeada

C_v = contracción volumétrica

C_L = contracción lineal

V_c = Volumen de la cavidad

V_{mp} = Volumen de la parte moldeada

Los polímeros semicristalinos modificarán más su tamaño dependiendo de la temperatura en la cual se les permita cristalizar. Las cadenas que forman esferulitas y lamelas ocupan menos espacio (mayor densidad) que las cadenas en estado amorfo. Por ello, el grado de cristalinidad afecta directamente a la densidad final de la pieza. La temperatura del molde y el enfriamiento deben ser los adecuados para obtener partes de buena calidad.

A continuación se enumeran algunos valores comunes de contracción en polímeros para inyección (para diseño de moldes es conveniente solicitar una hoja de parámetros técnicos del proveedor de polímeros).

| Termoplástico | Contracción (%) |
|----------------------------------|------------------------|
| Acrilonitrilo butadieno estireno | 0,4 – 0,8 |
| Poliacetal | 0,1 – 2,3 |
| Polimetilmetacrilato (PMMA) | 0,2 – 0,7 |
| Acetato de celulosa | 0,5 |
| Nylon 6,6 | 1,4 – 1,6 |
| Polycarbonato | 0,6 |
| Polietileno de baja densidad | 4,0 – 4,5 |
| Polipropileno | 1,3 – 1,6 |
| Poliestireno | 0,4 – 0,7 |
| PVC RIGIDO | 0,6 – 1,2 |
| PVC plastificado | 1,0 – 4,5 |

Tabla 1.2.- Contracciones de los materiales [9]

Temperatura de proceso

Para inyectar un polímero, específicamente un termoplástico, es necesario conocer su temperatura de transición vítrea (T_g) y su temperatura de fusión de la región cristalina (T_m), si es un polímero semicristalino.

La temperatura de operación de cada termoplástico no es estándar, y varía según el proveedor. Es por tanto necesario solicitarle una *Hoja de Especificaciones* donde se encuentre tanto el índice de fluidez como la temperatura de trabajo, (intervalo de temperaturas), y la temperatura de degradación, con lo cual se obtiene un intervalo dentro del que se puede trabajar el material eficientemente.

Flujo y diseño de flujo

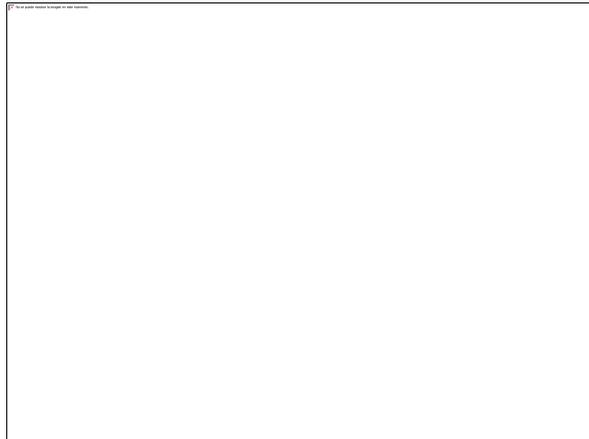


Figura 1.3.-Flujo de polímero en la cavidad. La viscosidad del polímero aumenta al enfriarse en contacto con las paredes del molde.

Los polímeros son materiales cuyas viscosidades son muy altas, por lo que su flujo es lento y complicado. La razón de esto es que son cadenas muy largas de unidades más simples, a causa de lo cual los polímeros presentan una orientación con respecto al esfuerzo cortante al que han sido sometidos. En general, es conveniente eliminar lo más posible la orientación de las moléculas, propiedad que se contrapone a la rapidez de moldeo (y por tanto al costo). Sin embargo, si el estrés debido a una orientación extremadamente alta no se libera, la pieza se deformará al enfriarse o al calentar el material en su aplicación.

El polímero entra en el molde y se va acumulando desde el punto de entrada, arrastrándose por las paredes y empujando el polímero en el centro (Figura. 1.3). Cuando este toca las paredes del molde, comienza a enfriarse y solidificarse. Esto ocurre con cierta baja orientación, pero cuando se va llenando la cavidad en capas posteriores lejanas a la pared del molde, la orientación se incrementa y un inadecuado enfriamiento congela los estreses generados, siguiendo un perfil de velocidades semejante al del flujo parabólico en un tubo.

El flujo de un polímero a través de una cavidad rectangular se puede estudiar utilizando condiciones isotérmicas, o con el molde a temperaturas menores que la T_g del polímero a estudiar. Para los experimentos en condiciones isotérmicas, se observa que el tipo de polímero no modifica el flujo, que mantiene un perfil de velocidades constante, con un flujo radial después de la compuerta hasta llenar las esquinas. Después, el flujo se aproxima a un flujo tapón, perdiendo movilidad en las zonas de contacto con la pared fría. El flujo de cada polímero es estudiado por la reología.

Una aproximación al estudio del flujo de polímeros en el llenado de un molde es la ecuación de Hagen y Poiseuille, la cual considera parámetros en el régimen laminar. Esta ecuación, despejada para la viscosidad del material es:

$$\eta = \frac{8 \Delta P Q}{\pi L r^4}$$

Donde: η = Viscosidad

r = Radio del tubo o canal

ΔP = Caída de presión

L = Longitud del tubo

Q = Flujo volumétrico

τ = Esfuerzo cortante

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$ = Velocidad de corte

Para el diseño de los canales en el molde, se observa de la ecuación anterior que la velocidad de corte y la viscosidad se ven afectadas por el diseño del radio del canal. Si el flujo volumétrico y la caída de presión se mantienen constantes, en condiciones isotérmicas entre los ciclos de moldeo, la viscosidad permanece constante y por lo tanto se espera que la calidad de la pieza moldeada sea constante.

En la práctica, los ingenieros toman en cuenta que los polímeros son fluidos no newtonianos (particularmente, son materiales viscoelásticos). Por lo tanto, se deberán hacer correcciones a la fórmula anterior dependiendo de para qué plástico se realizará el molde. También se utilizan "curvas de viscosidad", que grafican η frente a $\frac{\Delta v}{\Delta y}$.

Un parámetro importante en el flujo incluye la temperatura; otra buena aproximación a polímeros obedece a la ecuación de Arrhenius:

$$\eta = A e^{\frac{E}{RT}}$$

Donde:

A = Constante del polímero en cuestión

R = Constante universal de los gases ideales, Por lo general expresada en Joules, kelvins y moles

T = Temperatura

E = Energía de activación para el flujo viscoso

Ventilación y presión

Conforme el polímero avanza desde la entrada o tolva, va reduciendo el tamaño de sus gránulos por medios tanto mecánicos (fricción, compresión y arrastres) como térmicos (aumento en su temperatura interna), llegando al estado gomoso o fusión, dependiendo de si el material es amorfo o semicristalino. Conforme este material avanza, el aire presente experimenta un aumento de presión y generalmente escapa en dirección opuesta al avance del polímero. Si esto no ocurre, entonces es necesario abrir una compuerta de ventilación, igualándose de esta manera la presión generada a la presión atmosférica. Debido a las propiedades de viscosidad y de arrastre del polímero, sólo escapa mediante la ventilación una parte mínima de plástico.

El error más común con la ventilación es el añadir aditivos espumantes desde la tolva. Los espumantes generan gas, aire o agua que queda atrapado en células abiertas o cerradas del polímero. No obstante, si la presión disminuye a presión atmosférica, este gas generado escapa, resultando así un polímero sin espumar. Para una eficiente alimentación del espumante, éste debe ser añadido después de la ventilación o eliminar el mismo [9].

Técnicas modernas

Algunas de las técnicas modernas incluyen la inyección de multicomponentes, es decir, una pieza que contiene dos polímeros unidos entre sí o un polímero con diferentes colores y aditivos separados en capas. En esta técnica es posible inyectar dos polímeros en la misma pieza. Existen dos métodos para lograr esto: uno es con dos unidades de inyección, y otro con una unidad de inyección compuesta. Un polímero queda inmerso en el otro, o un color queda inmerso en el otro, ahorrando así costos: esta técnica es llamada inyección emparedado o sándwich. Otra posibilidad es inyectar con agentes formadores de celdas o espumantes que reducen la densidad de la pieza moldeada.

La inyección puede contener injertos metálicos, cerámicos o plásticos. Estos son colocados manual o automáticamente en el molde, sobre el cual es inyectado el polímero que, por medios geométricos, evita su separación al enfriarse.

En el moldeo con reacción química no se usa el extrusor, sino más bien componentes líquidos que se van administrando. Estas resinas pueden estar activadas o activarse al unir los diferentes fluidos. Un ejemplo típico de polímero inyectado por este proceso es el poliuretano y la poliurea. Generalmente, las temperaturas en este proceso son mucho más bajas que las temperaturas de la inyección con husillo.

La inyección de hule y de termoestables consiste en un proceso que incluye la inyección con todos los ingredientes necesarios para el curado o vulcanizado, pero a temperaturas bajas en el cañón. Éste debe provocar poca fricción en el material para evitar el sobrecalentamiento y reacción prematura, cambiando así la cinética de reacción deseada. La reacción termina precisamente en el molde, el cual no es necesario enfriar.

La inyección con equipo moderno de polímeros semiconductores y de polímeros conductores requiere mucho menos cuidado que en el proceso de semiconductores tradicionales de silicio y germanio. El cuarto limpio no es necesario y el proceso se puede llevar a cabo con un cuidado semejante al de inyección de equipo médico.

La inyección de materiales compuestos como madera-plástico o fibras naturales con polímero, fibra de carbón y nanopartículas tienen una problemática particular, debido a que el husillo tiende a romper, cortar o aglomerar las partículas, por lo que presentan un doble reto: por una parte deben ser dispersadas y distribuidas (como cualquier pigmento), a la vez que deben permanecer lo más estables posible. Las nanopartículas generalmente forman aglomerados, que reflejan una pérdida de propiedades mecánicas y no un aumento, ya que el estrés es función directa del área de la unión partícula-polímero.

Compuertas (puntos de inyección)

Las funciones concretas de una compuerta son simples: sirven para ayudar a que el polímero solidifique pronto cuando la inyección concluye, y para separar fácilmente los remanentes de inyección de la pieza final. Muchas veces elimina la necesidad de cortar o desbastar este sobrante y acelerar el flujo de material fundido, que se refleja en una menor viscosidad y mayor rapidez de inyección.

Para garantizar el buen funcionamiento de un polímero inyectado, es imprescindible tener en cuenta los fenómenos de transporte y particularmente el flujo del polímero. Recuérdese que no se habla de moléculas o iones como los metales fundidos, sino de largas cadenas de macromoléculas en estado gomoso. Las compuertas son así diseñadas para mejorar el flujo y para permitir un orden distributivo del mismo. Las compuertas más comunes son:

| Tipo de compuerta | Esquema | Característica |
|----------------------|---|---|
| Compuertas de canal | (sin esquema) | Alimentan de manera directa desde la cavidad. |
| Compuertas de espiga |  | Alimentan el polímero permitiendo una ligera relajación de esfuerzos. |
| Compuertas de aguja |  | Se llenan desde los bebederos; comúnmente usadas en moldes de tres placas, permiten altas velocidades y se llenan con facilidad; pueden eliminarse sin dificultad de la pieza moldeada. |
| Compuertas lateral |  | Alimentan desde un lado del molde; comúnmente utilizadas para impresión múltiple. |
| Compuertas anular |  | Se usan para moldear partes huecas ya que su flujo es previamente modificado a la forma final. |

| | | |
|--------------------------|---|---|
| Compuertas en diafragma |  | Similares a las compuertas anular, pero distribuyen el material fundido desde el canal de alimentación. |
| Compuertas de abanico |  | Sirven para cubrir áreas grandes o largas de manera homogénea y distributivamente correcta. |
| Tipo de compuerta | Esquema | Característica |
| Compuertas de lengüeta |  | Estas compuertas minimizan el efecto de jet y ayudan a lograr un flujo de régimen laminar cuyo número de Reynolds es adecuado para la inyección. |
| Compuertas tipo película |  | Sirven para moldear homogéneamente áreas planas y delgadas, sobre todo en productos translúcidos y transparentes como objetivos de policarbonato, láminas de PMMA y dispositivos ópticos de medición, ya que minimiza las aberraciones cromáticas y ópticas debidas a ondas formadas por flujo en régimen turbulento. |

Tabla 1.3.- Tipos de puntos de inyección (compuertas).

Estas compuertas se utilizan en el diseño de molde preferentemente bajo la experiencia y el diseño por computadora, con programas como mold flow que simulan el flujo de polímeros en el molde.

CAPITULO 2

Descripción de los Acetales, características y propiedades

Polióxido de metilo (POM)

El polioximetileno (POM), también conocido como poliacetal, resina acetálica o poliformaldehído, es un termoplástico semicristalino de alta rigidez, tenacidad y estabilidad dimensional. Fue obtenido por primera vez por el químico Staudinger, pero debido a su inestabilidad térmica, en aquella época se desechó para su fabricación industrial. El hecho de que sus propiedades mecánicas eran incluso superiores a las de las poliamidas, hizo que se trabajara intensamente para solucionar este problema de baja resistencia térmica, luego de varias investigaciones, en 1958 aparecieron el homopolímero y copolímero acetático o de acetal [3].

Formación de acetales

A grandes rasgos se puede decir que en la formación de un acetal se forma a través de una reacción por condensación donde se adicionan dos moléculas de alcohol al grupo carbonilo y se elimina una molécula de agua, los acetales solamente se forman en condiciones ácidas.

La reacción se realiza abandonado el aldehído con un exceso de alcohol y un poco de ácido, ambos anhidros; por lo general, el ácido es cloruro de hidrógeno. En la preparación de los etil acetales el agua formada se suele eliminar mediante un azeótropo (mezcla líquida) de agua benceno y alcohol etílico. Los acetales simples generalmente son difíciles de preparar por reacción entre acetonas y alcoholes, y se obtienen de la manera que se presenta a continuación.

En la figura 2.1 se muestra esquemáticamente las reacciones presentes a las que se hace referencia en el párrafo anterior.

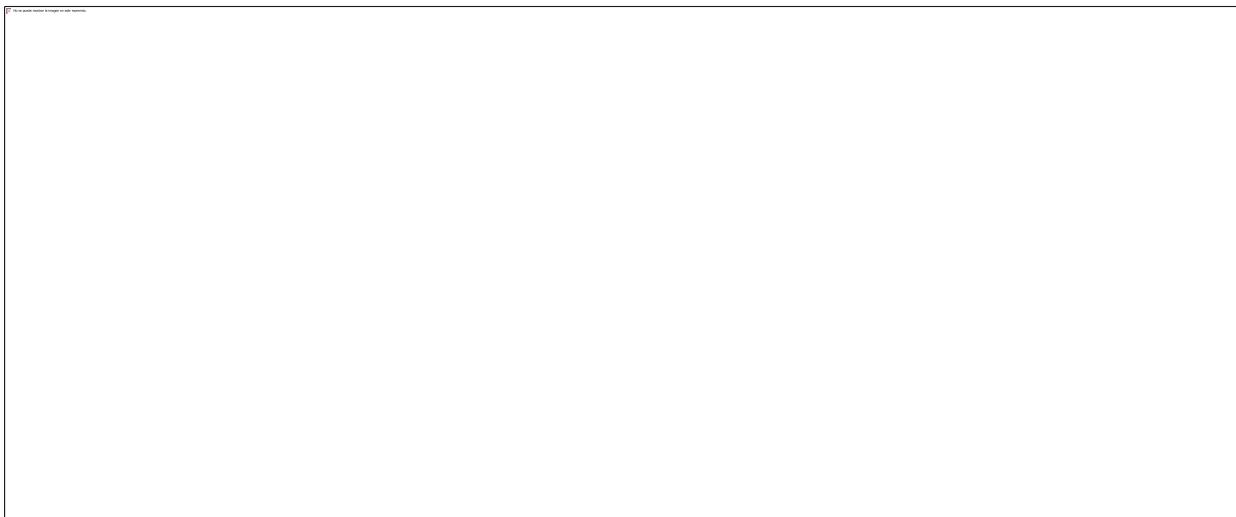


Figura 2.1.- Formación del acetal por condensación [3].

La primera parte del mecanismo es una adición al grupo carbonilo catalizada por un ácido. El catalizador ácido protona al grupo carbonilo y el alcohol (nucleófilo débil) ataca al grupo carbonilo protonado activado. La pérdida de un protón del intermedio cargado positivamente da lugar a un hemiacetal, la figura 2.2 presenta los pasos a seguir para la formación del hemiacetal.

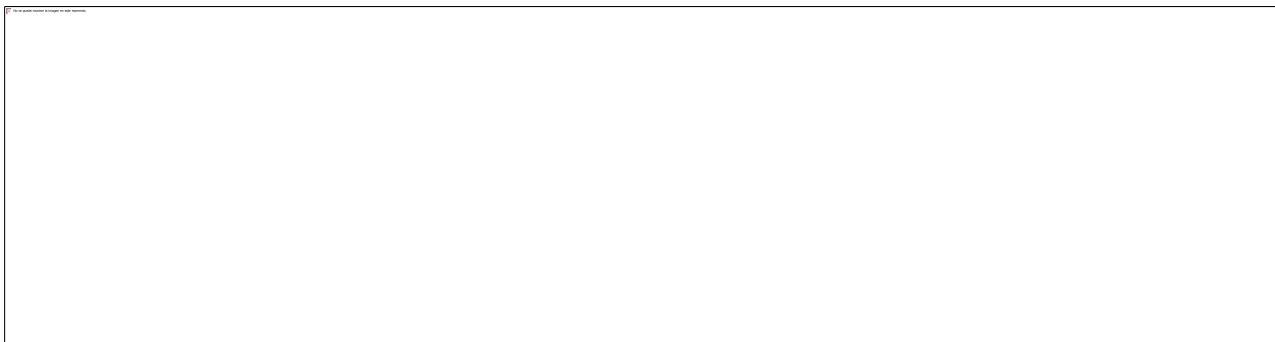


Figura 2.2.- Mecanismo para la obtención de un hemiacetal [3].

La mayoría de los hemiacetales son demasiado inestables para ser aislados, es por ello que se sigue un segundo mecanismo para la obtención de un Acetal estable; es decir, la protonación del grupo hidroxilo, seguida de la pérdida de agua, da lugar a un carbocatión estabilizado por resonancia y el ataque del metanol al carbocatión, seguido de la pérdida de un protón, da lugar al acetal, tal como se muestra en la figura 2.3.

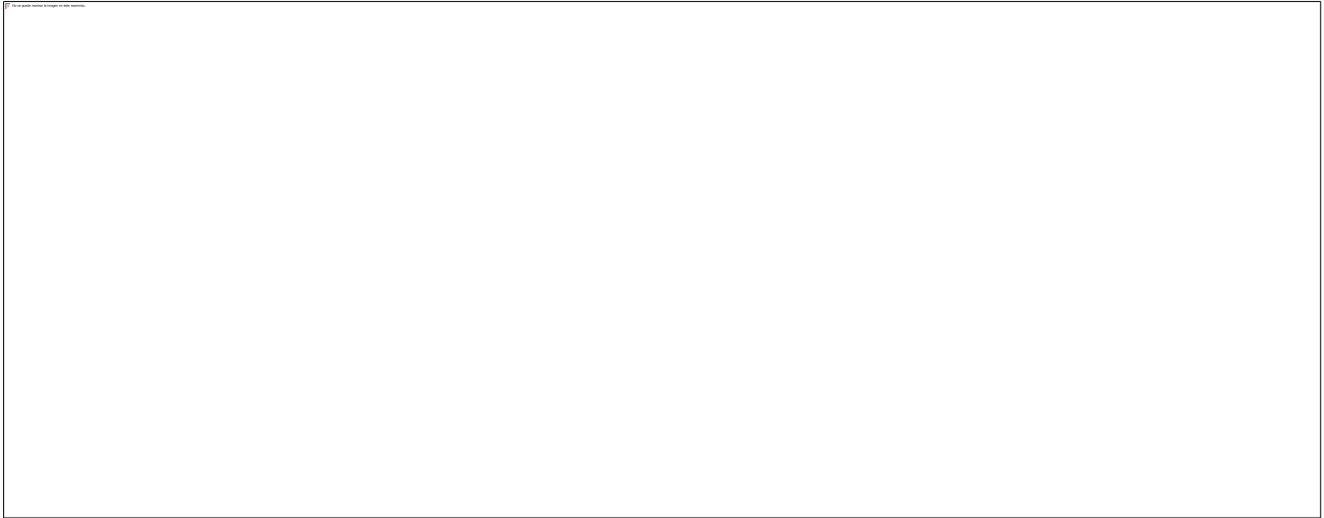


Figura 2.3.- Obtención del Acetal estable [3].

Tipos de Acetales

El acetal se puede encontrar en el mercado de dos maneras: en forma de homopolímero y acetal copolímero. La cadena molecular principal del acetal homopolímero es la espina dorsal de la cadena del acetal copolímero, pues el acetal copolímero agrega el óxido de etileno aleatoriamente a través de la cadena del acetal homopolímero.

Debido a que los acetales absorben mínimas cantidades de humedad, sus propiedades se mantienen constantes en variados ambientes. La baja absorción de humedad deja como resultado, una excelente estabilidad dimensional para el maquinado de partes y aplicaciones mecánicas con tolerancia cerrada. Este tipo de materiales también cumplen con buen funcionamiento como aislantes eléctricos que combinan su buena resistencia mecánica y alta rigidez; entre otras cualidades cumplen con un amplio intervalo de resistencia a productos químicos incluyendo muchos solventes, En cuanto a su apariencia, este material cumple con requerimientos exigentes como la brillantez, aunque son materiales sensibles a los rayos UV [3].

Las piezas o componentes de acetal (POM) han sustituido ampliamente a las piezas metálicas de precisión. Sus aplicaciones en el campo de componentes de baja tolerancia y dimensionalmente estables se encuentran en relojería, tableros, mecanismos de control y conteo, electrónica e ingeniería de precisión.

El copolímero de POM tiene como principal característica el tener agregados de etileno que lo hacen tener un buen aumento en su alargamiento, por ello, el POM es muy adecuado para cierres, seguros para ensamble y clips para fijación de tubos y revestimientos interiores y exteriores de automóvil.

Entre las aplicaciones clásicas para el uso del acetal se encuentran los sectores de mecánica general, automotriz, aparatos electrodomésticos y sanitario, se incluyen ruedas dentadas y otros componentes de transmisión, niveles de combustible y componentes de carburador, componentes de

bomba en contacto con agua caliente o gasolina, llaves mezcladoras, cabezales de regaderas, válvulas y otros accesorios diversos.

Otras aplicaciones comprenden ganchos, tornillos, piezas de cerradura, contenedores para aerosoles, mecanismos de máquinas, equipos deportivos y de oficina.

Características de la marca registrada Celcon ®

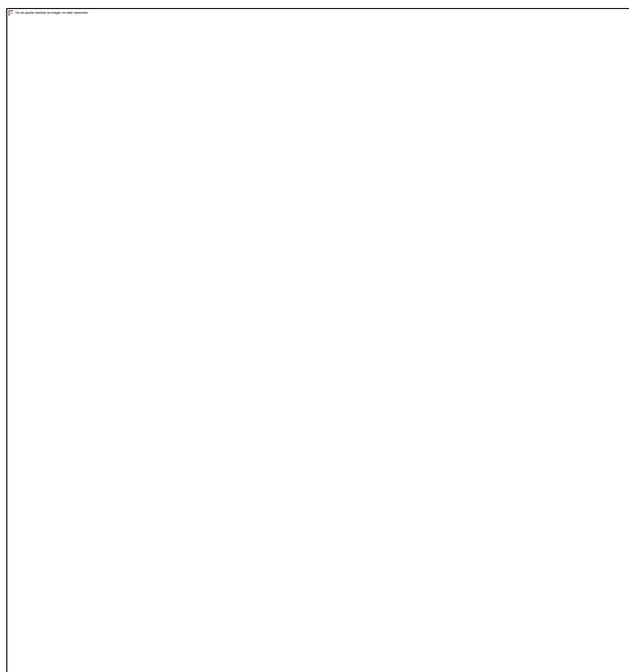
Los productos de Celcon se utilizan ampliamente en el moldeo por inyección y son también fácilmente procesables por otras técnicas convencionales como la extrusión, moldeo por compresión, moldeo rotacional y moldeo por soplado.

El Celcon homopolímero se encuentra en forma de polímero con diferentes viscosidades y en grados especiales, que incluyen fibra de vidrio, aditivos para resistencia a los UV, bajo brillo, bajo desgaste y los productos láser de coloración.

Ciertos grados especiales ofrecen unas propiedades excelentes para resistencia a la combustión. Todos los productos de Celcon están disponibles en una amplia gama de colores que incluye las últimas tecnologías en apariencias metálicas.

Debido a su versatilidad, los productos Celcon se utilizan en numerosas aplicaciones tales como engranajes, resortes, clips, perillas y las juntas de los componentes del sistema de combustible, juguetes, lavadoras, herramientas de mano, bañeras y los cinturones de seguridad.

El moldeo por inyección, permite que se diseñen piezas con configuraciones cada vez más complejas que sería imposible fabricarlas en metal, es ahí en donde los polímeros con apariencia metálica como **Hostaform® POM** pueden emplearse. En la gráfica 2.1 se muestra el porcentaje de ahorro en el costo que se tiene al utilizar material plástico con apariencia metálica contra una pieza realizada por procesos de conformado de metal.



Gráfica 2.1.- Ejemplo de ahorro de una palanca hecha de plástico vs. metal. (www.ticona.com)

Algunas ventajas de reemplazar al metal por plástico con apariencia metálica es la reducción de peso, durabilidad, fácil de reciclar, eliminación de procesos secundarios (por ejemplo: pintura, recubrimientos, etc.), acabados superficiales diversos, entre otros. La figura 2.3 muestra una comparación entre una pieza de plástico pintada y una moldeada con apariencia metálica.



Figura 2.3.- Comparación de pieza de plástico pintada vs. Pieza de plástico con apariencia metálica.

Hostaform® POM

El Hostaform POM es un acetal copolímero fabricado con trioxano y pequeñas cantidades de comonomeros. Su estructura lineal y alto grado de cristalinidad determinan las buenas propiedades físicas de este termoplástico, ya que su constitución química de cadenas moleculares con unidades

comonómeras distribuidas le confieren, comparado con los homopolímeros, una gran estabilidad frente a la degradación térmica y oxidativa [1].

Propiedades:

El Hostaform POM se caracteriza por:

- alta tenacidad (hasta -40°C)
- alta dureza y rigidez
- temperatura de uso hasta 100°C
- favorable comportamiento eléctrico y dieléctrico
- gran estabilidad química, p. ej. disolventes, combustibles, alcalis fuertes
- agrietamiento por tensión nulo
- buen comportamiento deslizante
- baja absorción de agua lo que proporciona una alta estabilidad dimensional fácil transformación

Este conjunto de características del polímero base pueden modificarse enormemente con aditivos adecuados.

Aplicaciones:

Hostaform POM es un material válido para la producción de todo tipo de piezas de ingeniería. Se utiliza en prácticamente todos los sectores de la industria de tal manera que aquí solo podemos mencionar algunos ejemplos [1].

Industria del Automóvil: Componentes para mecanismos de cinturones de seguridad, elementos de ajuste de los asientos, elevelunas, techos solares, reposacabezas y ventiladores axiales, mecanismo de cierre, sistemas de alimentación de combustible, separadores de agua, depósitos de compensación y almacenamiento, tapones de depósito de combustible, altavoces, carcasas, rejillas de ventilación, ruedas dentadas.

Electrodomésticos: Carcasas, ruedas dentadas, asideros, cojinetes, levas, discos.

Construcción de maquinaria: Engranajes, rodillos, rapadores, chasis base, bushings, cojinetes deslizantes, cadenas transportadoras.

Electrónica: Teclados de teléfono, cuerpos de bobina, interruptores, elementos muelle, soportes de armadura, video cassettes, platinas.

Medicina: Piezas para sistemas de inhalación y dispensadores de insulina.

Plomería: Mecanismos reguladores de flujo en duchas, grifos de desagüe, mono-mandos, filtros autolimpiantes.

CARACTERISTICAS COMPARATIVAS ENTRE CELCON Y HOSTAFORM

En 1951 la firma Du Pont en Estados Unidos produjo por primera vez resina acetálica, un homopolímero obtenido a partir de formaldehído (formol), a la que designó con la marca Delrin®. Apenas unos meses más tarde otra firma norteamericana – Celanese – logró desarrollar otro acetal

co-polímero de formaldehído y acetaldehído que presentó con la marca Celcon®. Posteriormente autorizó a la empresa alemana Hoechst a fabricar bajo licencia este mismo producto bajo la marca Hostaform®. Es por ello que no existen diferencias sustanciales entre un Hostaform y un Celcon, sin embargo los aditivos, cargas y apariencias, varían de una marca a otra. En la siguiente figura se observa la ficha técnica de ambas marcas comerciales.

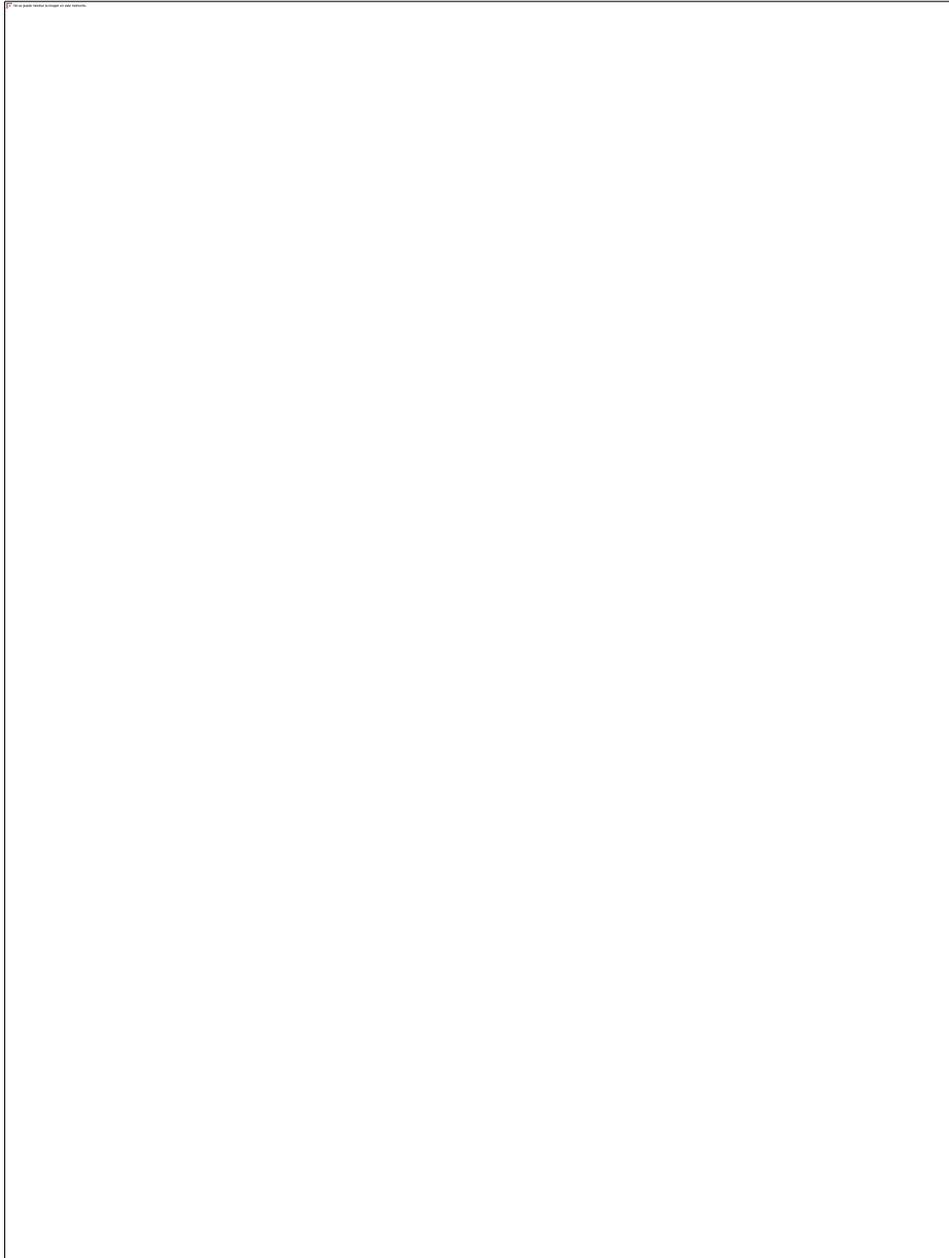
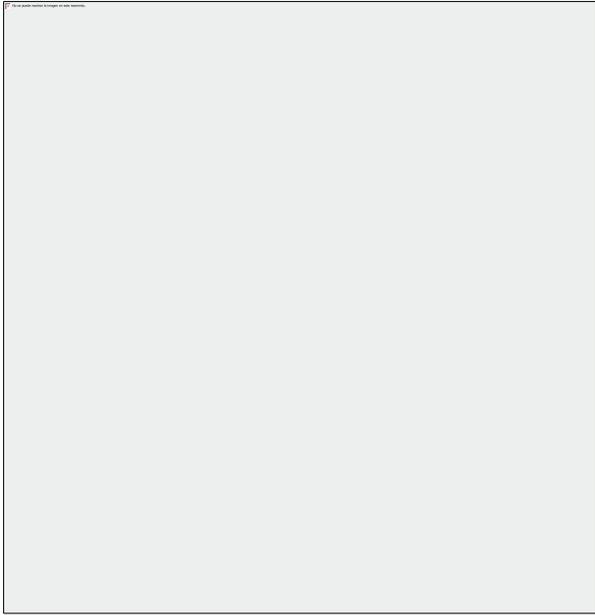
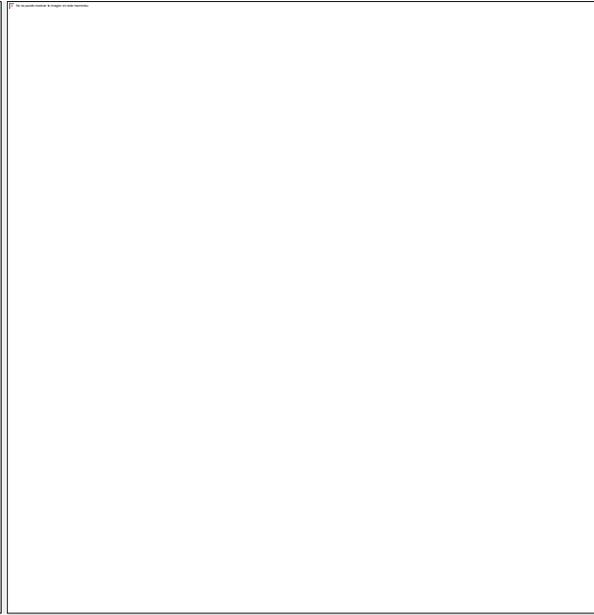


Figura. 2.4.- Comparación de datos técnicos del Celcon M90 y Hostaform LX90Z. (www.ticona.com)

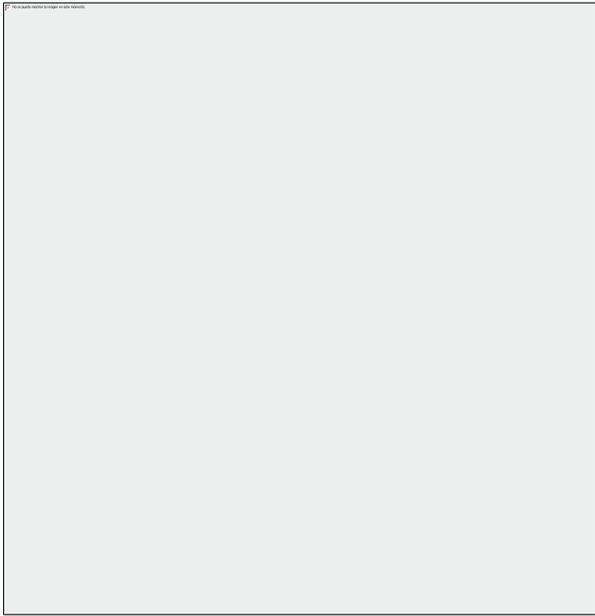
En la siguientes gráficas se muestra cómo se comporta el Celcon y el Hostaform a diferentes temperaturas, al principio de cada curva se comportan de igual manera hasta la zona plástica, es donde ya depende de cada tipo de acetal, de su formulación en específico.



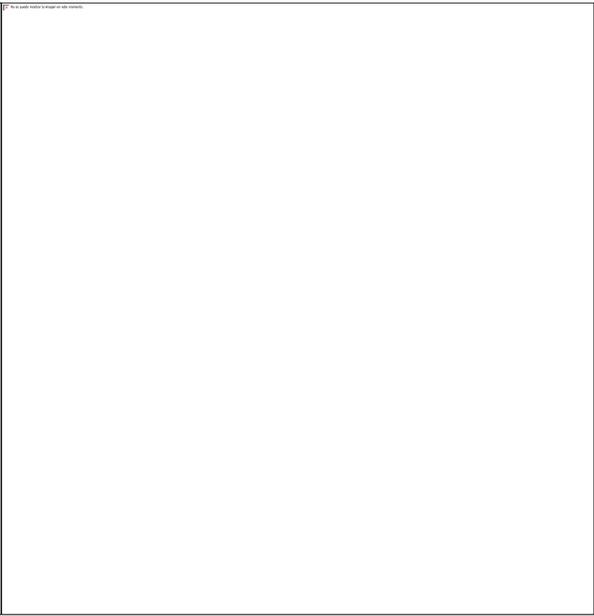
Gráfica Esfuerzo–deformación a -40°C .



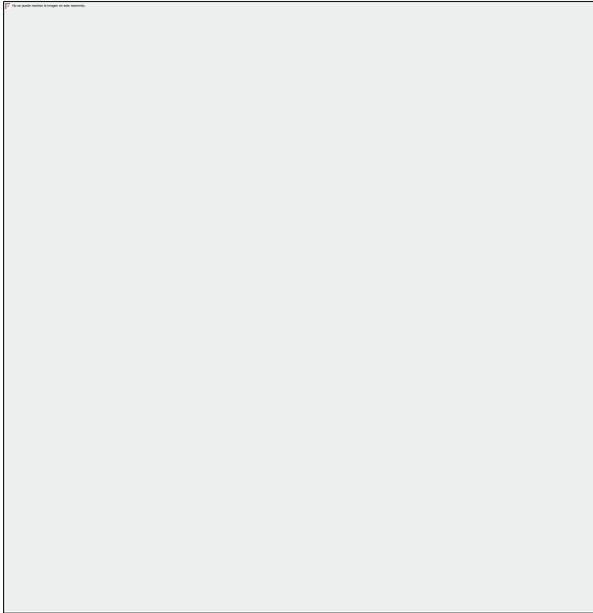
Gráfica Esfuerzo–deformación a 23°C .



Gráfica Esfuerzo–deformación a 40°C .



Gráfica Esfuerzo–deformación a 80°C .



Gráfica Esfuerzo–deformación a 100°C.

Gráficas 2.2.- Esfuerzo –deformación a diferentes temperaturas del (1) CELCON M90™ y (2) HOSTAFORM LX90Z (www.ticona.com)

Propiamente al Acetal se le pueden suministrar pocos aditivos y refuerzos, dichos aditivos pueden ser disulfuro de molibdeno que sirve como anti-friccionante, con aditivos minerales, con PTFE, PE, con aceite de silicona para mejorar características al deslizamiento en seco y desgaste, también se pueden reforzar con un 10-40% de fibra de vidrio, y se refuerzan también de forma anisotrópica con esferas de vidrio o minerales para aumentar su rigidez.

IMPORTANCIA DEL CUIDADO Y LA PREPARACIÓN DEL MATERIAL ANTES DE LA INYECCIÓN

Secado del material

Los acetales provienen de la familia cuyo componente principal es el éster, que pasa por el proceso de polimerización por condensación; por ello, es necesario un secado previo antes de pasar a fabricar cualquier producto. En estos plásticos, aunque se haya hecho un pre secado, si existe humedad causará daños en el acabado final de la pieza durante su proceso.

Si los polímeros se calientan por arriba de su temperatura de fusión, pequeñas cantidades de humedad en los gránulos gruesos o en las superficie causarán una reacción química, ésta reacción puede degradar al polímero, la viscosidad del producto fundido y la resistencia mecánica, con cantidades mayores de humedad provocan que su acabado superficial sea rugoso, con escamas, con burbujas, huecos en el producto, escurrimientos en la boquilla, producto fundido espumoso o con baja viscosidad, líneas de flujo y rayas plateadas en áreas cercanas a los puntos de inyección, contrayendo además bajo control de dimensiones.

De esta manera, la humedad se puede acumular sobre la superficie de los gránulos o pellets, absorbiéndola hacia el interior de los mismos. Este tipo de materiales se le conoce como higroscópicos, otros materiales con estas características son los nylon y los policarbonatos, entre otros. Si un polímero higroscópico se expone a la atmósfera, el vapor de agua migra hacia el interior del gránulo grueso, en donde parte de las moléculas de agua se unen a las cadenas del polímero de las resinas mediante fuerzas intermoleculares. Estas fuerzas son las que dificultan el secado de los polímeros higroscópicos. En condiciones idénticas un tipo de polímero puede absorber agua con mayor rapidez o lentitud que otro. Un tipo de polímero también puede equilibrar su contenido de humedad en un grado superior o inferior respecto a otro cuando ambos se exponen a condiciones idénticas (Figura. 2.4) [9].



Figura 2.4. Comparación de absorción de humedad entre polímeros[9].

El contenido de humedad de un polímero higroscópico puede variar dependiendo de:

- El tipo de polímero
- El periodo que el polímero se expone a la atmósfera
- La humedad atmosférica
- La temperatura
- Aditivos (p.e. Talco)

Un polímero higroscópico seco expuesto a la atmósfera absorberá vapor de agua hasta llegar a un equilibrio con el aire que lo rodea. Este proceso se lleva a cabo en minutos o días. Aun después de haber alcanzado el equilibrio, digamos un 50% de humedad relativa (HR), el polímero absorberá humedad si posteriormente se le expone a 80% de HR. Si la HR se redujera a 30%, parte de la humedad absorbida será cedida hasta alcanzar nuevamente el equilibrio, es por ello que el proceso de absorción es totalmente reversible dependiendo de:

- La temperatura del polímero.
- La humedad relativa/punto de rocío del aire que rodea al polímero.
- El tiempo expuesto a la temperatura prescrita y condiciones de humedad.
- El flujo de aire en la tolva.

Temperatura del polímero durante el secado.

La temperatura del polímero es el aspecto más importante en la mayor parte de las aplicaciones de secado. Generalmente, mientras más elevada sea la temperatura del secado, más rápido se secará el polímero; sin embargo, hay un límite práctico de temperatura. Si el polímero se expone a una temperatura de secado muy elevada los gránulos gruesos se aglutinarán y formarán apelmazamientos en la tolva de secado. Algunos polímeros, por ejemplo, el nylon, se puede oxidar a las temperaturas de secado que rebasen las que haya recomendado el fabricante. También, por el contrario, existe un límite práctico inferior, cuanto más baja pueda ser la temperatura de secado y continuar siendo efectiva, mayor será el tiempo de secado del polímero.

Tiempo de secado

El tiempo es crítico para el proceso de secado por que los gránulos gruesos no se secan instantáneamente. Una vez que a los gránulos gruesos los rodea aire caliente con un punto de rocío bajo en una secadora deshumectante se debe esperar lo suficiente para que el calor del aire circulante migre al centro de los gránulos gruesos. A medida que la temperatura dentro de los gránulos gruesos crece, la humedad se difunde y migra hacia el aire caliente seco que rodea la superficie del gránulo grueso. Cuando las moléculas de agua llegan a la superficie de los gránulos, el aire seco caliente las lleva hacia fuera [9].

Los fabricantes de resina han definido cuánto tiempo requiere este proceso para cada producto y grado particular de polímero. Sin embargo, es importante notar que el tiempo efectivo de secado es el que los gránulos se exponen al aire seco, caliente.

Almacenaje

Un almacenaje adecuado es importante, sobre todo cuando el material absorbe humedad, o se rompe el costal por malas maniobras de los montacargas.

En la actualidad existen varias formas de almacenamiento, dependiendo de cómo se compra la materia prima es su tipo de almacenamiento, si el material se compra en costales o gaylord se recomienda que se estiben y se le coloque una película plástica para su mejor aislamiento y que se identifique cada estiba sin mezclar varios tipos de plásticos, esto es, si en una estiba está polipropileno no combinarlo con polietileno, para evitar confusiones por falta de conocimiento.

También se pueden almacenar en Silos, método recomendado cuando se tiene un consumo de materia prima muy elevado y de un solo tipo de polímero, a los Silos se le puede acondicionar varias partes, por ejemplo un ventilador que regule la humedad dentro del Silo, también se le pueden acondicionar tuberías que se conecten con otras para la mezcla de pigmentos o cualquier tipo de aditivos que se requiera.

CAPÍTULO 3

Descripción del proceso de inyección

Durante el proceso de inyección de plásticos, existen diversas variables que involucran la producción de objetos o piezas; las cuales pueden presentar diferentes calidades en los productos terminados. A través de la experiencia se ha constatado que encontrar los valores adecuados para las variables involucradas, con lleva una mejora en la calidad antes mencionada. Por ello, es necesario que se determine la convergencia de las variables que definan el proceso de producción, a la que mejor se conoce optimización del proceso.

Como ejemplo, podemos mencionar la apariencia de una pieza que cobra su importancia cuando estas son producidas por el proceso de inyección, pues de acuerdo a la manera en que se mueva el flujo para llenar la cavidad, dará oportunidad quizás a la existencia de defectos. Por lo anterior, en éste capítulo se explicará la influencia de los parámetros que se involucran durante el proceso de inyección.

Se comienza por conocer las características de la máquina que se ocupará, en nuestro caso hablaremos de una máquina DEMAG ERGOtech 50-270, las que se muestran en la tabla 3.1.

| Unidad de cierre | | |
|--|-----|---------|
| Fuerza de cierre | kN | 500 |
| Fuerza de enclavamiento | kN | 500 |
| Carrera máxima de apertura | mm | 400 |
| Altura mínima de molde | mm | 210 |
| Altura máxima de molde | mm | - |
| Distancia Máx. entre platos | mm | 610 |
| Platos portamoldes | mm | 540x540 |
| Distancia útil entre columnas | mm | 355x355 |
| Peso máximo de molde | kg | 400 |
| Expulsor hidráulico | | |
| Carrera expulsor | mm | 125 |
| Fuerza expulsor | kN | 41.2 |
| Fuerza de retroceso expulsor | kN | 14.9 |
| Unidad de Inyección | | |
| Diametro del husillo | mm | 35 |
| Relacion L/D | | 20 |
| Presión de inyeccion | bar | 1890 |
| Volumen desplazado | ccm | 144.3 |
| Peso pieza inyectada (PS) | g | 128 |
| Carrera máxima de dosificación | mm | 150 |
| Carrera máxima de boquilla | mm | 250 |
| Profundidad de inversión de boquilla (SVO) | mm | 40 |
| Presión de apoyo de boquilla | kN | 66 |
| Potencia inst. calefacción de cilindro. | kW | 7.5 |
| Capacidad de tolva | L | 35 |

Tabla 3.1. Características necesarias a conocer de la DEMAG ERGOtech 50-270.

Para empezar el proceso de inyección, se debe asegurar la limpieza de unidad de inyección, de preferencia utilizando Polipropileno (PP) o polietileno de alta densidad (PEHD) como limpiadores, dado que estos materiales pertenecen a la familia de las poliolefinas, misma que se deriva a los aceites y grasas; en caso de que el husillo estuviese muy sucio, también se ha recomendado utilizar poliestireno (PS), según las prácticas industriales.

Preparación del material

La preparación depende de cada tipo de material, si es higroscópico o hidrofóbico, para el primer caso necesariamente se acude al secado, para el segundo caso el secado se emplea cuando el material haya estado en condiciones adversas de almacenamiento, tal como se describió en el capítulo anterior. La existencia de humedad durante el proceso de inyección hace que la pieza acumule partículas de vapor afectando definitivamente la apariencia, siendo muy evidente en materiales que son transparentes. Durante la preparación, también se incluye el agregado de aditivos que no estuviesen contemplados por el proveedor de la materia prima, como son los colorantes, las fibras, talcos, entre otros.

Una vez preparado el material, se introducen los valores de temperatura proporcionados por el fabricante de la máquina, o el proveedor de la materia prima, para que una vez alcanzadas se pueda verificar el buen funcionamiento de los sensores. De la misma manera se fijan los valores requeridos para la velocidad de inyección y la velocidad de rotación del husillo. La presión de inyección, la presión posterior y la contrapresión, son parámetros que muchas veces dependen de la complejidad de la pieza, a las que se les suma variaciones en la temperatura y variaciones en las velocidades antes fijas.

Ya determinados los parámetros anteriores, según las prácticas industriales, se inicia la producción con un primer ciclo de prueba y se observa el tipo de defecto arrojado, el color del material y la manera en como fluye éste, además se mide la temperatura de la masa a la salida de la boquilla.

Cuando se observa el color del material, se asegura la no degradación del mismo a través del oscurecimiento de la pieza o amarillento en caso de ser blanco, en el caso de que la pieza a fabricar sea de color negro, la degradación se puede esperar si el flujo presenta burbujeo o incluso el olor puede ser un indicio de degradación.

Cuando se presta atención en la manera de fluir del plástico, simplemente se asegura que el frente del flujo presente una geometría parabólica, desde luego, esto no siempre sucede ya que los materiales que contienen refuerzos el frente de flujo debe de presentar un ordenamiento uniforme de las fibras o partículas que se mueven en conjunto con el plástico.

En seguida, se mide la temperatura de la masa a la salida de la boquilla, para asegurar que la masa tenga una temperatura por arriba de la transición vítrea, o para semicristalinos por arriba de la temperatura de fusión. Previo a este paso, se fija las temperaturas que recomienda el proveedor, poniendo un perfil de temperaturas en forma descendente desde la zona de dosificación hasta la zona de alimentación con un intervalo de 10 a 20 [°C], aproximadamente, si las especificaciones del proveedor no indican lo contrario.

Posteriormente, se hace una observación de los primeros ciclos en el modo semiautomático para el ajuste de las presiones, velocidades y temperaturas, así como la cantidad de masa a transferir, verificando entre corrida y corrida la calidad de la pieza, en este momento, no hay que olvidar ir verificando el control del llenado de la cavidad, por medio del volumen de dosificación, o la presión posterior.

Durante los trabajos de optimización se recomienda modificar sólo un parámetro a la vez, para ir llevando el control del proceso de tal forma que se aprecie la repercusión en la calidad de la pieza, la experiencia ha mostrado que la cantidad de repeticiones por cada parámetro es de 3 a 5 veces.

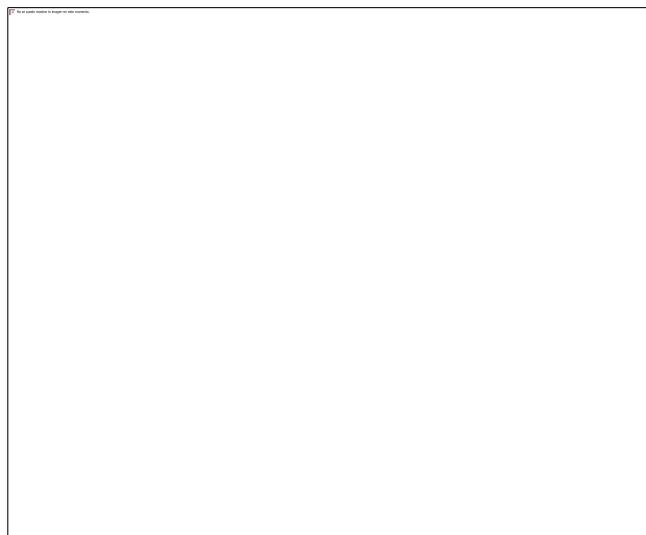
Parámetros para la optimización (más comunes):

1. Temperatura del cilindro y de la masa

Debido a que la viscosidad del material es un parámetro importante para determinar el movimiento de los fundidos plásticos, es la temperatura tanto del cilindro como de la masa responsables indirectos del control del movimiento del mismo, teniendo un fundido poco viscoso a altas temperaturas, y lo contrario a bajas temperaturas; como lo dicta la ecuación de Arrhenius para flujos viscosos.

$$\eta = A e^{B/T}$$

Donde T es la temperatura absoluta y A y B son constantes del polímero.



Gráfica 3.1.- Comportamiento de la viscosidad en diversos plásticos cuando se aumenta la temperatura en un intervalo pequeño de 420 a 480°K. (<http://www.plastico.com>)

Como se puede ver en esta ecuación el comportamiento exponencial nos indica que la variación de temperaturas se controla de manera paulatina para poder controlar los defectos relacionados con la temperatura (del cilindro) y la velocidad de giro del husillo (temperatura por fricción en la masa),

tales defectos se plantearán más adelante. En la figura 3.1 se observan las variaciones de viscosidad de los plásticos más comunes.

2. Temperatura del molde

Para controlar el frente de flujo dentro de la cavidad, (figura 3.1) se debe tomar en cuenta y en algunos casos controlar la temperatura del molde hasta el llenado completo de la pieza.

El perfil de llenado no es una típica parábola, porque el polímero cercano de la pared fría del molde solidifica formando una piel entre el molde y el núcleo. La capa cercana a la pared del molde se enfría rápidamente (**capa fría**). Este rápido enfriamiento de la piel inducirá características amorfas, mientras que el núcleo, que se enfría mucho más lentamente da lugar a un núcleo más cristalino.

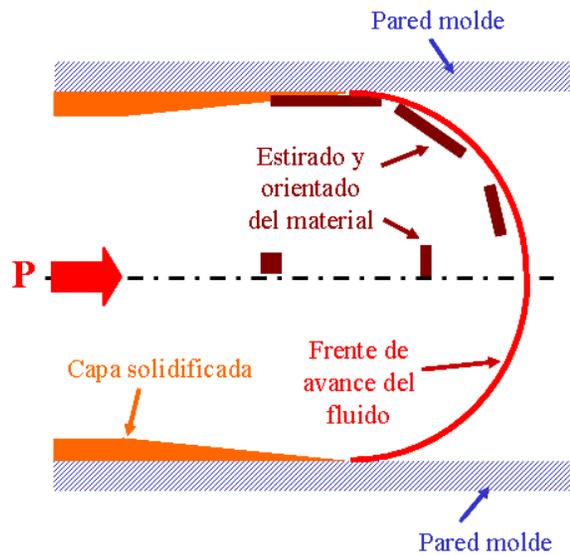


Figura. 3.1.- Comportamiento del material dentro del molde.[10]

En otras palabras, con una adecuada temperatura del molde aseguramos que la capa solidificada sea de un tamaño adecuado, pues si se enfría demasiado rápido puede ocasionar que se tape u obstruya el paso del material, además se pueden presentar defectos en la apariencia final de la pieza. Para asegurar que la temperatura del molde sea constante es necesario disponer de un eficaz equipo de atemperador o de refrigeración.

3. Velocidad de inyección

La velocidad de inyección determina la expansión de la masa fundida en el molde. Principalmente se debe de elegir velocidades altas y/o velocidades escalonadas si se tienen distintos espesores.

La velocidad de inyección dependerá de los siguientes factores

- A) La viscosidad del polímero.
- B) Condiciones del molde.
- C) Tamaño y número de puntos de entrada de material.
- D) Tamaño de los canales o venas de alimentación del material.
- E) Salidas de aire en el molde.
- F) Temperatura de la masa fundida.
- G) Temperatura del molde.
- H) Acabado superficial de la pieza.

Cuando se moldean piezas de secciones delgadas se requieren, generalmente, velocidades de inyección altas con objeto de llenar la pieza antes de que se solidifique. El uso de una velocidad de inyección alta mejorará el aspecto y brillo superficial de la pieza, ya que la cavidad del molde se llena completamente antes de que el plástico comience su solidificación, variando la velocidad de inyección adecuadamente se pueden reducir los defectos superficiales en la pieza, tales como las ráfagas y manchas en la zona del punto de inyección [10].

Por otro lado, hay materiales que necesitan velocidades extremadamente bajas para obtener un mejor acabado, esto se debe a que contienen aditivos, cargas y/o fibras especiales que no permiten que al material fluya con un frente de flujo bien definido ocasionando una desorientación de las moléculas, que a su vez deriva en defectos de apariencia y defectos en el punto de inyección.

- Velocidad de inyección. Perfil de velocidades.

El perfil de velocidades se establece en relación con la geometría de la pieza como ya se mencionó, aunado a esto influye el tipo del material, para evitar defectos durante el transcurso del llenado de la pieza sobre todo cuando existen cambios de espesores y geometrías con cambios de dirección. Cuando se inyectan materiales con carga también condicionan al uso de un perfil de velocidades.

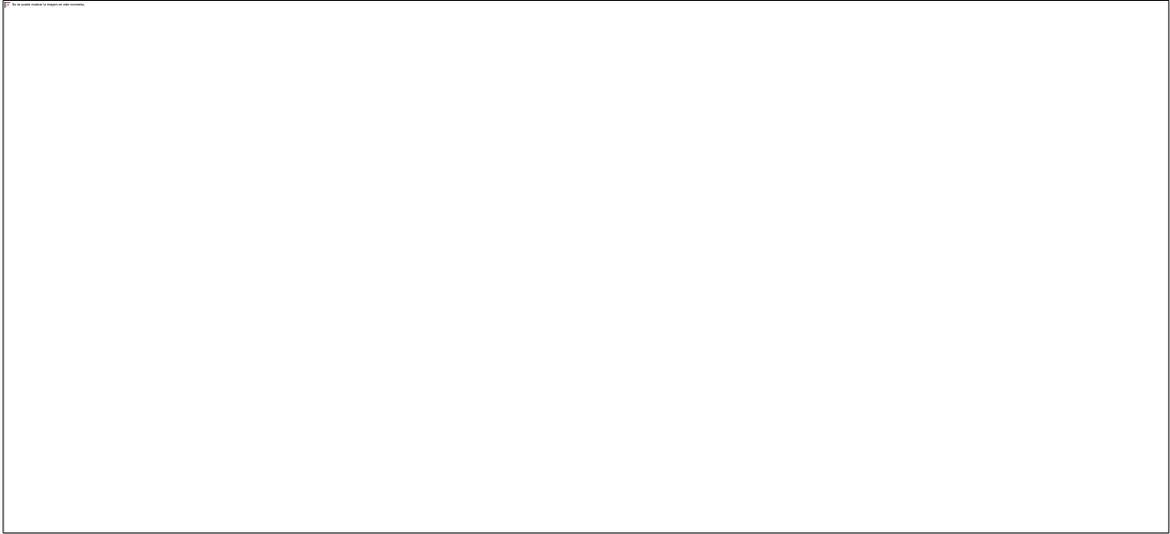
4. Presión de inyección.

Es la presión requerida para vencer las resistencias que el material fundido produce a lo largo de su trayectoria, desde el cilindro de plastificación hasta el molde, esta presión corresponde a la fase de llenado del molde. Factores que afectan a la presión necesaria para llenar al molde:

- a. Viscosidad del Material.

La viscosidad es la resistencia al movimiento del fluido manifestada por los esfuerzos cortantes a través de su paso, por tanto, el tipo de material, los aditivos presentes, así como sus cargas presentarán variaciones al movimiento del fluido y por ende a cambios en los parámetros del proceso. En la figura 3.2 se observan los cambios en tiempo y presión en una poliamida sin carga y con carga de fibra de vidrio.

Como puede observarse se requiere una presión más alta para la poliamida con refuerzo que sin ella. En la misma figura, también se puede observar, como la temperatura del fundido modifica la presión del llenado, mientras más baja sea ésta mayor será la presión necesaria.



Gráfica 3.2.- Presión contra tiempo de llenado.

b. Temperatura del molde.

Para mantener un flujo constante se debe cuidar la temperatura del molde, ya que si existen variaciones en distintos puntos de éste pueden provocar que el movimiento del flujo disminuya en las zonas de más baja temperatura ocasionando que el llenado sea incompleto.

c. Temperatura de inyección.

Otro punto importante es la temperatura del barril, ya que si tenemos una temperatura baja necesitamos una mayor fuerza para poder mover al material, y por el contrario, si tenemos una temperatura alta se necesita una menor fuerza relacionada con una viscosidad baja.

d. Geometría del molde y de la pieza.

Como todo flujo que transita en un canal, el tamaño a lo ancho, la longitud del recorrido y el cambio de dirección, provocan una variación en la presión de inyección e incluso al hablar del tipo de colada, las diversas configuraciones tendrán el efecto mencionado. En el caso de un molde con colada fría, básicamente la pieza completa que sale del proceso de inyección tiene dos partes, una es el producto final y el otro es la colada (vela y ramales), esto significa que tenemos desperdicio y además que el molde necesita que se caliente durante cierto tiempo con el mismo material que se inyecta. Por el contrario, en el caso de colada caliente, que tiene

resistencias en la colada, se denota que todo el material se convierte en producto, y no se tiene desperdicios, además que se pueden tener un mayor número de cavidades que el de colada fría, sin necesidad de calentar el material inyectado ya que cuenta con sus propias resistencias. Por tal razón los sistemas de canal caliente presentan una menor pérdida de presión respecto a moldes de colada fría [10]

- En el caso de colada caliente, las principales características del sistema se dividen en dos grupos que son: Características operativas y Características de diseño.
 - Características operativas
 - Los sistemas de colada caliente, aplicados correctamente, ofrecen un menor consumo de materias primas y una menor pérdida de presión en comparación con los sistemas de canales que se solidifican en cada ciclo (colada fría). Por lo tanto, son apropiados para inyectar productos grandes.
 - Ofrecen un ahorro de tiempo de llenado y espacio en las máquinas de inyección, debido a que los ciclos de los sistemas de colada caliente son más cortos que los de colada fría, por lo que se minimizan los posibles efectos adversos a las propiedades del material.
 - Existen sistemas de colada caliente integrados y listos para ser montados en el molde. Estos sistemas se utilizan especialmente en moldes de cavidades múltiples.
 - Los moldes de inyección de plástico de colada caliente permiten producir simultáneamente partes de diferentes tamaños y formas en el mismo ciclo.
 - Características de diseño del molde
 - Flexibilidad de distribución y uniformidad de llenado: Los sistemas de colada caliente proporcionan una gran flexibilidad en la distribución de las cavidades en un molde. El correcto dimensionamiento y distribución de los canales garantizan un óptimo funcionamiento de llenado de las cavidades.
 - Expulsor (Botado) simplificado: Una distancia reducida de apertura ayuda a disminuir el tiempo del ciclo de moldeo y a simplificar los moldes de múltiples cavidades.
 - Líneas de refrigeración adecuadas: El diseño optimizado de las líneas de refrigeración es muy importante en el balance térmico en las placas del molde para obtener una disminución del tiempo de ciclo.
 - Variedad de opciones de puntas de inyección: El diseño de la punta de inyección influye de manera importante en la calidad de la pieza y en el buen desempeño del sistema, ya que una vez que la pieza es enfriada, es la sección de transferencia entre el material solidificado y fundido. En la figura 3.2 se puede observar el arreglo de los puntos de inyección para un molde de colada caliente convencional.
 - Mantenimiento fácil en producción: Los sistemas de colada caliente de múltiples cavidades se fabrican pensando en facilitar el mantenimiento correctivo o preventivo directamente sobre la máquina de inyección. La placa “Porta cavidades” puede desprenderse fácilmente del lado fijo. Una vez removida esta placa se tiene acceso a los puntos de inyección, resistencias y termopares para dar el mantenimiento necesario [10].

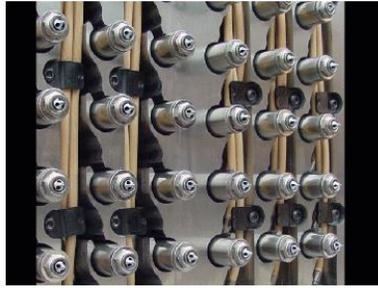


Figura 3.2.- Arreglo de puntos de inyección en un molde de colada caliente [10].

e. Geometría del punto de inyección.

Existen diferentes geometrías para el punto de inyección, tanto como para colada caliente como para la colada fría, en ambos procesos se debe tomar en cuenta la geometría de la pieza para poder elegir un sistema de colada adecuada, ya que existen diversos arreglos.

f. Geometría de la pieza: espesor, longitudes y complejidad.

La geometría de la pieza es un factor importante que influye directamente a la presión de inyección y a la velocidad de inyección, debido a que al momento de tener distintos espesores el flujo de material se comporta de diferente manera en cada sección transversal de la configuración geométrica de la pieza.

5. Fuerza de cierre.

La fuerza de cierre determina la capacidad de la máquina que se usará para la producción de la pieza a elaborar; esta se calcula como el producto de la presión en la cavidad, por el área proyectada, ver figura 3.3. Tal que:

$$\text{Fuerza de Cierre} = \text{Presión en la cavidad} \times \text{Área proyectada}$$

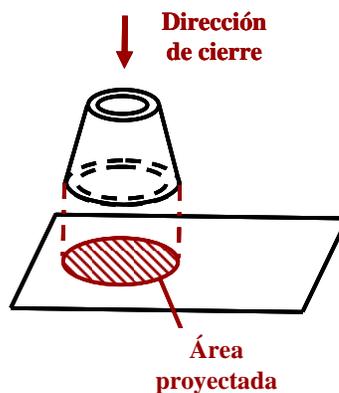


Figura 3.3.- Esquema del área proyectada de la pieza.

Pero la presión dentro de la cavidad varía dependiendo del material, que en la práctica se aplica un coeficiente corrector (KM) para ajustar la capacidad de la máquina con la viscosidad del material. También se contempla un margen de seguridad entre el 10% y el 15%, . La ecuación anterior se redefine como:

$$FC = P_{media} \times AreaP \times KM \times KS$$

Donde:

FC: fuerza de cierre.

P_{media} = Presión media del molde.

AreaP: Área proyectada.

KM: Coeficiente corrector.

KS: Coeficiente de seguridad.

La presión media se calcula a partir de su relación con el espesor promedio de la pared, tal como se muestra en la figura 3.4. Se obtiene el espesor medio de pared (S), haciendo coincidir en una vertical con la curva LF/S, para después obtener la presión en el molde trazando una horizontal a partir del punto encontrado.

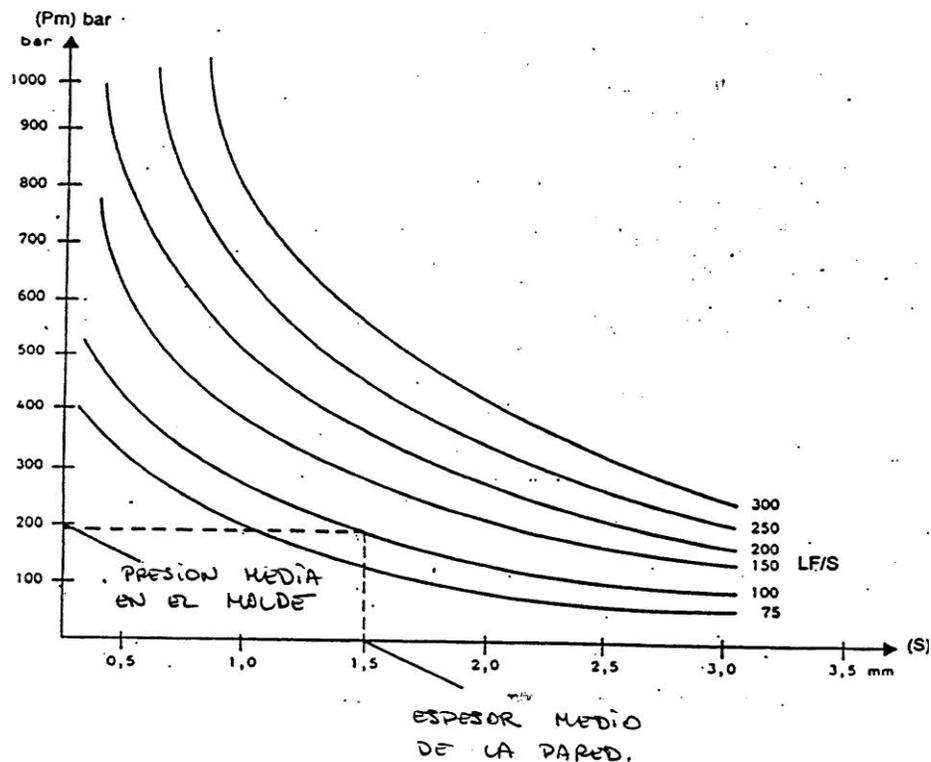


Figura 3.4.- Gráfica para obtener la presión media en el molde.

También puede obtenerse la presión dentro del molde de acuerdo a la experiencia en la práctica que se muestra en la figura 3.5. En ella se muestran algunas presiones dentro del molde que fueron encontradas para diferentes tipos de piezas.

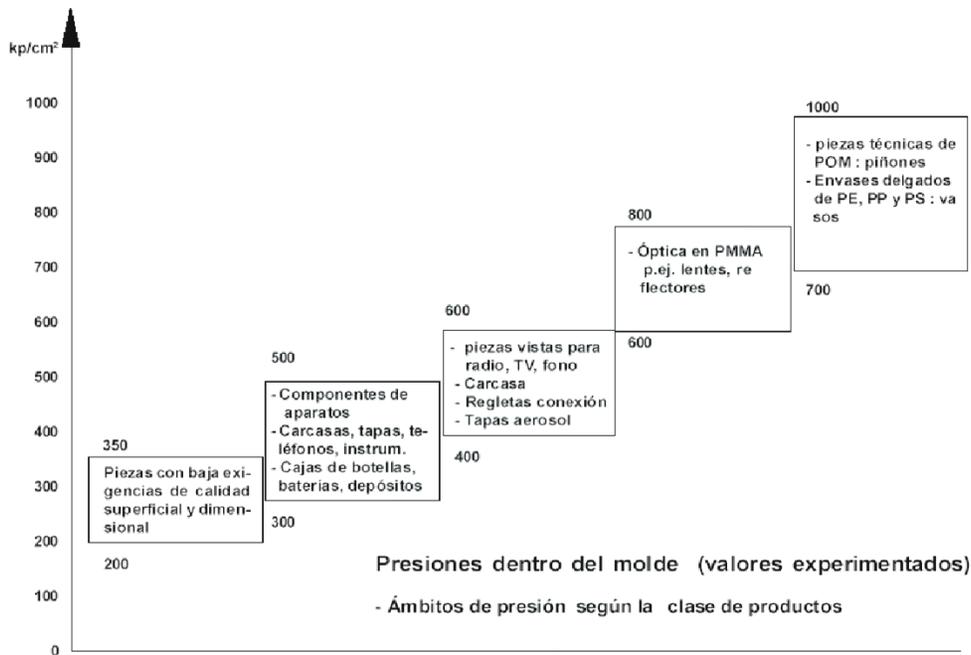


Figura.3.5.- Presiones experimentales dentro del molde. [10]

6. Presión remanente (presión posterior)

La presión remanente es aquella presión hidráulica que se ejerce en la fase posterior a la presión de inyección con el fin de compensar las zonas de contracciones hasta la solidificación de la pieza. Esta etapa es importante, porque es aquí donde se determina el encogimiento, tamaño, peso, estabilidad, grado de cristalización, tensiones internas y distorsión en piezas inyectadas, así como la aparición de burbujas, rechupes o rebabas.

RELACIÓN P-V-T dentro de la una cavidad

En cualquier polímero, las relaciones entre presión, volumen y temperatura determinan el comportamiento del material y definen las temperaturas de transición vítrea y de fusión de caso de amorfo y semi-cristalino respectivamente y el efecto de la presión de inyección en relación directa a la de la cavidad.

En la gráfica 3.3. Se muestra la variación del volumen específico de un material amorfo con respecto a la temperatura. A diversas presiones, se observan los respectivos cambios volumétricos sin variar el punto de inflexión de transición vítrea (Tg). En la gráfica 3.4. Se muestra como varía el volumen específico de un polímero semicristalino en función de la temperatura para diferentes presiones. A una presión constante, desde que el material está fundido, el volumen específico disminuye paulatinamente conforme el material se enfría. Cuando el material alcanza la temperatura de cristalización se produce una disminución muy acentuada del volumen específico como consecuencia de las zonas de cristalización del material. Cuando el proceso de cristalización finaliza, el volumen específico disminuye otra vez progresivamente hasta encontrar la inflexión de Tg. Pasando este punto el volumen específico disminuye en menor proporción. En esta gráfica se observa que también se conserva la inflexión del punto de fusión a diferentes temperaturas [6].



Gráfica 3.3.-Curva PvT de un material amorfo

Gráfica 3.4.-Curva PvT de un material semicristalino

7. Tiempo de presión remanente.

Después del llenado volumétrico y durante la fase remanente se compensa la contracción del volumen causada por el enfriamiento del material en la cavidad, dejándola el tiempo suficiente para la terminación de la solidificación. El tiempo de remanencia es efectivo hasta la solidificación del material en la entrada de la cavidad.

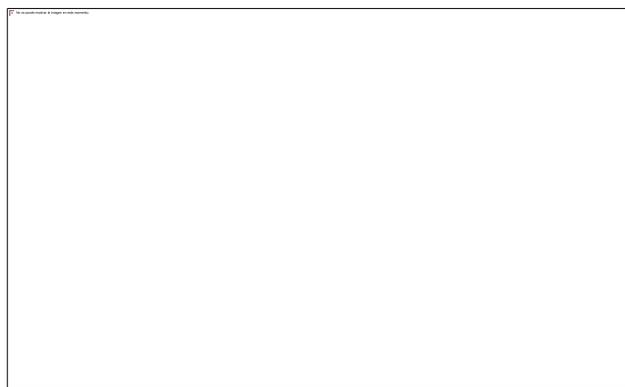
Para determinar el tiempo requerido en la presión remanente es necesario considerar el espesor de pared y la sección transversal del punto de inyección. El tiempo es determinado por el incremento en el peso de la pieza, espesor de pared y tamaño de la entrada.

El tiempo de remanencia se determina aumentando paulatinamente su valor hasta que se verifique que ya no existan altas contracciones, rebabas ni cambios de peso.

Al incrementar el tiempo de remanencia antes de que solidifique el punto de inyección se obtiene mayor presión interna en el molde, empaquetamiento de la colada, tiempo insuficiente para plastificar y mayor consumo de energía. Por el contrario, el tiempo demasiado corto de acción de la presión ocasiona reflujos de la masa, poca compresión y compactación en la estructura del material, piezas demasiado pequeñas, mayor variación en peso y dimensiones finales.

8. Punto de conmutación (punto de conmutación)

El punto de conmutación está relacionado con los puntos anteriores y se presenta cuando no existe una variación en el peso de la pieza aunque se le incremente el tiempo de la presión remanente, en otras palabras el punto de conmutación es el tiempo óptimo de sostenimiento de la segunda presión. Esto se ilustra mejor en la siguiente gráfica. Como se puede observar, al aumentar el tiempo de la segunda presión, el peso de la pieza varía en función a ésta.



Gráfica 3.5.- Presión de sostenimiento en función del peso.

Para determinar el tiempo de la presión de sostenimiento (remanente), es necesario precisar el espesor de la pieza, ya que al inicio de la gráfica se tiene un tiempo igual a cero, para tal efecto se recomienda llenar la pieza a un 95 % y en piezas delgadas a un 98 %, posteriormente se incrementa el tiempo de la presión hasta que ya no exista variación en el peso [4].

9. Tiempo de enfriamiento

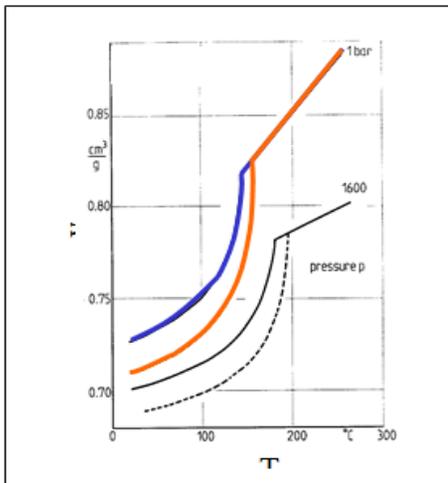
El tiempo de enfriamiento sirve para enfriar la pieza dentro de la cavidad hasta obtener suficiente estabilidad dimensional para su desmoldeo. El enfriamiento real comienza cuando el material entra a la cavidad del molde, sin embargo, el tiempo de programación en la máquina comienza al finalizar la presión remanente.

Para una primera estimación del tiempo de enfriamiento, en la práctica se han encontrado las siguientes relaciones:

| | |
|----------------------|---------------------------|
| PC | $T_{enf}=2.17 \times s^2$ |
| PA6, PBT, PE-LD | $T_{enf}=2.64 \times s^2$ |
| ABS, PS, SAN, PA 6,6 | $T_{enf}=2.82 \times s^2$ |
| PE-HD, PMMA | $T_{enf}=3.00 \times s^2$ |
| PP | $T_{enf}=3.67 \times s^2$ |
| POM | $T_{enf}=4.18 \times s^2$ |
| | s= espesor de pared |

Tabla 3.2. Valores prácticos de los tiempos de enfriamiento en diversos materiales

Una vez que la pieza ha solidificado en la entrada de la cavidad, ésta queda aislada en el interior del molde, independientemente de si el husillo se mantiene en posición o no. Al enfriarse el material aparecen dos efectos contrarios y simultáneos. Por un lado, como consecuencia del enfriamiento se da lugar a un aumento de la compactación del material, lo que supone la contracción del mismo; por otro lado, al disminuir la temperatura disminuye la presión a que está sometido el material, permitiendo su expansión, con el siguiente aumento de volumen de la pieza moldeada, lo anterior se explica mejor en la gráfica 3.6.



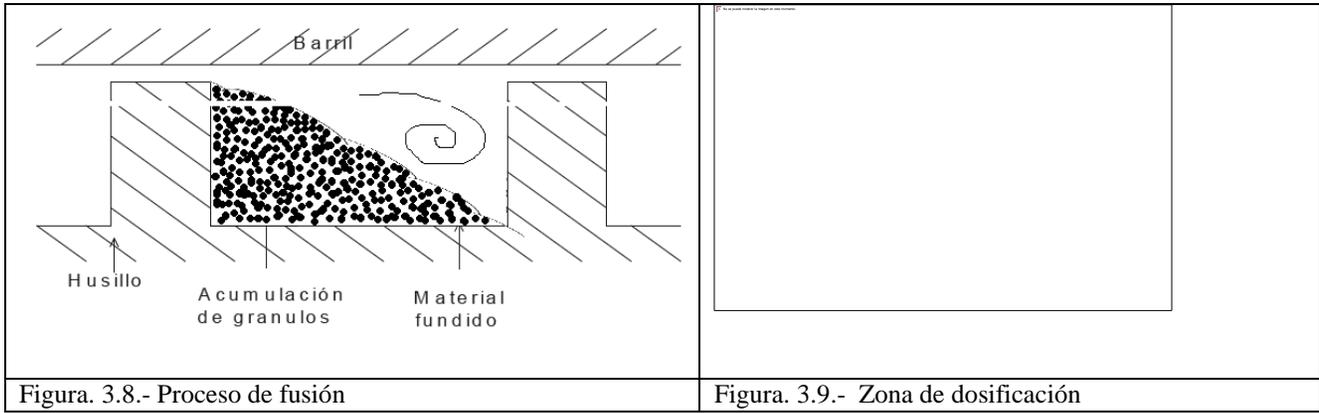
—= Enfriamiento rápido
 —= Enfriamiento lento
= Enfriamiento lento

Gráfica 3.6.- Estudio del enfriamiento en la curva PvT.

10. Revoluciones del husillo

La velocidad de giro del husillo permite transportar la materia prima, plastificarla y dosificarla hasta la cámara delantera que servirá de antesala al paso hacia el molde. Cambios en la velocidad de giro del husillo causan calentamiento en el material, debido a los efectos de cortante que se generan entre la materia prima y las paredes del husillo, generando a su vez, aumento de la temperatura de la masa, lo que provoca cambios en los parámetros de proceso. El polímero funde por el calentamiento del cañón con resistencias que lo envuelven y por la acción mecánica que tiene el husillo. Alrededor del barril se forma un película, resultado del incremento en la temperatura en el barril por acción de las resistencias y por la fricción, cuando ésta película crece, es desprendida de la pared del cañón por el mismo giro del husillo formando un remolino con material fundido y material que está en estado sólido. El material se funde completamente en la zona de compresión, cuya sección se mantiene a una temperatura menor a la temperatura de dosificación.

| | | |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| | | |
| Figura.3.6.- Zona de alimentación | | Figura. 3.7.- Zona de compresión |



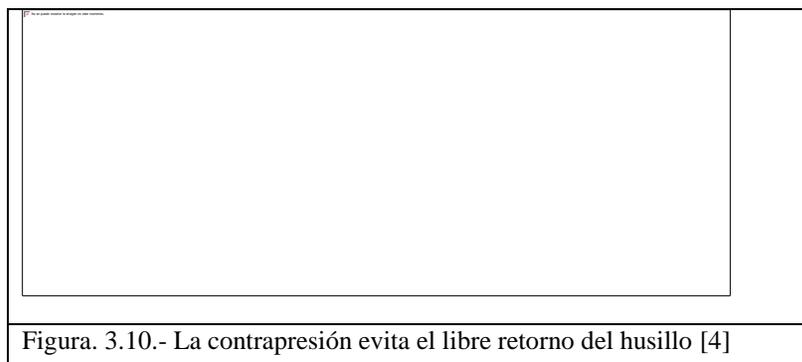
Las figuras 3.6 a 3.9 esquematizan el comportamiento del material desde que entra en estado sólido, pasando por la zona de compresión y finalizando con el material fundido listo para dosificarse[4].

Una velocidad angular baja del husillo produce un material plastificado más homogéneo, menor fricción del material y mínima variación de temperatura en masa durante la carrera de dosificación, y una velocidad elevada del husillo (altas revoluciones) aumentan la capacidad de plastificación, incrementa el calor en la masa por fricción, mayor diferencia en la temperatura de masa, elevado consumo de energía eléctrica y se aumenta el desgaste del husillo y la válvula.

11. Contrapresión

Es la presión que se opone al libre retroceso del husillo, y por tanto, al avance del material durante la fase de plastificación, carga o alimentación, esto es, el material acumulado en la punta del husillo genera una presión que obliga a su retroceso, mientras que la contrapresión se opone a este movimiento.

Una contrapresión controlada y una velocidad del husillo constante proporcionan una alimentación y avance uniforme del material en el cilindro, mayor homogeneidad del mismo, eliminación de aire captado en la carga, peso constante de la pieza ciclo a ciclo y mayor tiempo de plastificación.



12. Descompresión (retiro de husillo)

Es la distancia que el husillo recorre en sentido opuesto a la dosificación, con la finalidad de liberar la presión ejercida sobre el plástico, de tal manera que no salga el material al momento que se abra el molde.

Defectos, razones y soluciones en partes moldeadas

La inyección es un proceso muy complejo, en el cual la calidad de la pieza se ve afectada de aplicación en aplicación por los factores más variados.

La causa de los fallos en la calidad puede hallarse en parámetros de la máquina o proceso programados de forma errónea o un mal diseño del molde o de la pieza. Cuanto más aplicaciones de la pieza, son más numerosos las posibilidades de fallo. Empezando con fallos ópticos como ráfagas, rechupes o diferentes brillos, seguido por deficiencias en las propiedades mecánicas, como pueden ser burbujas de aire, inclusiones, o material mal plastificado en la pieza hasta desviaciones en las medidas de distinta índole.

Los defectos en partes moldeadas requieren experiencia tanto para ser identificados como para ser resueltos. Los operarios con años de experiencia en inyección son los mejores maestros de identificación y solución de problemas, ya que su experiencia les da las ideas y recursos necesarios para solucionar problemas rápidamente. Aquí se sugieren algunas de las soluciones a los problemas más comunes:

Tabla 3.3.- Defectos más comunes en la fabricación de partes de plástico [10].

| Defecto | Causas posibles | Probables soluciones |
|-----------------|---|--|
| Distorsión | Enfriamiento demasiado intensivo. Diseño inadecuado de la pieza. Tiempo de enfriamiento muy corto. Sistema de extracción inapropiado. Esfuerzos en el material. | Incrementar el tiempo de enfriamiento dentro del molde. Utilizar un polímero reforzado. |
| Flash | Presión de cierre demasiado baja. | Incrementar la presión de la unidad de cierre. |
| Líneas de flujo | Mala dispersión del concentrado de color o del pigmento. Temperatura demasiado baja. | Cargar el material más lentamente. Incrementar la temperatura del barril. Modificar el perfil de temperaturas. |
| Puntos negros | Hay carbonizaciones. | <u>Purgar</u> el husillo. Reducir la temperatura de proceso. Limpiar el husillo manualmente. |
| Piel de naranja | Incompatibilidad del material. | Disminuir la temperatura de proceso. Incrementar la temperatura del molde. Cambiar el concentrado de color. |

| Defecto | Causas posibles | Probables soluciones |
|--------------------------------------|--|--|
| Parte incompleta | Insuficiente material en la cavidad. Falta de material en la tolva. Cañón demasiado pequeño. Temperatura demasiado baja. Obstrucción de la tolva o de la boquilla. Válvula tapada. Tiempo de sostenimiento demasiado corto. Velocidad de inyección demasiado baja. Canales demasiado pequeños. Respiración insuficiente. | Inyectar más material. Cambiar el molde a una máquina de mayor capacidad. Incrementar la temperatura del barril. Incrementar la velocidad de inyección. Modificar el tamaño de los canales del molde. |
| Parte con rebabas | Dosificación excesiva. Temperatura de inyección muy alta. Presión de inyección muy alta. Tiempo de inyección muy largo. Temperatura de molde muy alta. | Dosificar menos material. Disminuir la temperatura de inyección. Disminuir la presión. Disminuir el tiempo de inyección. Disminuir la temperatura del molde. |
| Rechupados y huecos | Presión de inyección demasiado baja. Tiempo de sostenimiento de presión muy corto. Velocidad de inyección baja. Material sobrecalentado. Humedad. Enfriamiento del molde no uniforme. Canales o compuerta muy pequeños. Mal diseño de la pieza. | Incrementar la presión. Incrementar el tiempo de sostenimiento de presión. Disminuir la temperatura del barril. Incrementar la velocidad de inyección. Abrir el venteo o presequer el material. Modificar los canales de enfriamiento del molde o el flujo del agua. Modificar el molde. |
| Líneas de unión | Temperatura general muy baja en el molde. Temperatura del fundido no uniforme. Presión de inyección muy baja. Velocidad de inyección muy baja. Insuficiente respiración en la zona de unión de los flujos encontrados. Velocidad de llenado no uniforme. Flujo no adecuado del material por los canales o la cavidad. | Incrementar la temperatura. Incrementar la presión. Incrementar la velocidad de inyección. Modificar la respiración del material en el molde. Modificar la compuerta para uniformar el flujo. |
| Degradación por aire atrapado | Humedad. Degradación de aditivos. Temperatura demasiado alta. Respiración del molde insuficiente. | Secar el material. Disminuir la temperatura. Modificar la respiración del molde. |
| Delaminación de capas | Temperatura demasiado baja. Velocidad de inyección demasiado baja. Baja contrapresión de la máquina. Temperatura del molde muy baja. | Incrementar la temperatura. Incrementar la velocidad de inyección. Incrementar la contrapresión de la máquina. |
| Fracturas o grietas en la superficie | Temperatura del molde demasiado baja. Sistema de eyección demasiado agresivo o inadecuado. Empacado excesivo. | Incrementar la temperatura. Modificar las barras eyectoras. Utilice un robot para extraer la pieza. Disminuir la presión de sostenimiento. |

| Defecto | Causas posibles | Probables soluciones |
|--------------------------------------|---|--|
| Marcas de las barras eyectoras | Tiempo de enfriamiento muy corto. Temperatura del molde alta. Temperatura del polímero demasiado alta. Rapidez de eyección demasiado alta. Localización inadecuada de las barras eyectoras. | Incrementar el tiempo de enfriamiento. Disminuir la temperatura del fundido. Disminuir la rapidez de eyección. Modificar la ubicación de las barra eyectoras. |
| Quemado de la pieza | Quemado por efecto de jet. | Disminuya la velocidad de inyección. |
| El concentrado de color no se mezcla | Perfil incorrecto de temperaturas. | Probar un perfil inverso de temperaturas. Bajar la temperatura de las primeras dos zonas de la unidad de inyección. Usar un perfil de temperaturas más agresivo. |
| El color es más obscuro | La temperatura es demasiado alta. La compuerta es demasiado pequeña y se quema el polímero por presión. | Disminuir la temperatura. Modificar la compuerta del molde. |

Aunque en esta tabla se muestran algunas soluciones para los diferentes tipos de defectos, hay factores que no se toman en cuenta, como por ejemplo: la temperatura del aceite, si el molde está sucio, una adecuada circulación del refrigerante, si está contaminado el material, etc., es por ello que varios autores coinciden en que existen entre 100 y 200 variables que afectan directa o indirectamente al proceso.

CAPÍTULO 4

Alternativas para la optimización de un proceso de inyección

En la actualidad, un importante número de empresas no cuentan con procedimientos adecuados para el ajuste de los parámetros necesarios durante un proceso de inyección, sobre todo cuando existe la necesidad de probar un molde nuevo o un material nuevo; en la mayoría de los casos, se comienza por modificar parámetros de forma aleatoria dependiendo del defecto de la pieza, y bajo la experiencia del especialista en este tipo de acciones. Es por ello que en el presente trabajo se plantearán las alternativas que puedan ayudar a la solución sistemática del movimiento paramétrico durante la optimización de un proceso de inyección.

En la literatura encontrada, Montgomery, D.C., menciona que existen tres maneras de medir la experimentación de un proceso industrial, el del mejor acierto (Best Guess), un-factor-por-vez (OFAT) y siguiendo una metodología de diseño de experimentos (DoE). Dado la complejidad del proceso de inyección, las dos primeras estrategias se aplican a pie de máquina por la facilidad de analizar las piezas moldeadas e ir cambiando parámetros conforme las piezas se producen, siguiendo el método científico; pero se ha visto que la cantidad de información y los resultados del proceso para optimizarlos no siempre han sido satisfactorios; por lo que se requiere plantear una estrategia estadística que controle la cantidad de información presentada, como la estrategia DoE [7].

Por otro lado, en la ingeniería de diseño de productos plásticos, las grandes empresas continuamente utilizan simuladores de flujo para el correcto llenado de sus cavidades, donde muchas veces se establecen condiciones fijas de presión, tipo de material, temperaturas de llenado, como parámetros ideales a seguir. Esto da a pensar que la falta de simuladores mantiene a las pequeñas y medianas empresas a tener un rezago en el manejo de los parámetros de inyección, y muchas veces, cuando se compara el trabajo de campo con las simulaciones, por falta de experiencia en ese ámbito, el resultado es distante de lo que pasa durante la producción. Esos parámetros muchas veces dependen del tipo de maquinaria a utilizar, del molde, del proveedor del material y de las condiciones climatológicas que en el momento existan, por mencionar algunas.

Durante esta sección, se presentará una descripción de los procesos que actualmente se utilizan en la industria del plástico, comenzando por la obtención de datos a través de un simulador de flujo, mold flow, donde se describirán los resultados obtenidos del llenado de cavidades para una pieza de plástico, en este caso se utilizará un producto tipo perilla, seguido de los pasos que describen un proceso empírico que se emplea con frecuencia, se obtendrán muestras en una máquina de inyección DEMAG 50-270, donde se llevará una bitácora de los sucesos empíricos empleados, para finalizar con las propuestas hechas por expertos en la materia a nivel mundial como el método de moldeo científico y DoE.

El material a utilizar será un CELCON M90 de la marca TICONA y un HOSTAFORM LX90Z de la misma marca, ambos provenientes de la familia de los óxidos de metilo pero con características físico-químicas y de apariencia diferentes. En la tabla 4.1 se muestra el intervalo comparativo de propiedades entre ambos materiales, como puede observarse, las propiedades son muy parecidas dado que ambos materiales son acetales; sin embargo, el HOSTAFORM presenta aditivaciones y cargas adicionales para proporcionar la apariencia metálica, esto trae como consecuencia variaciones en los parámetros de inyección.

Data Sheet Comparison

| | CELCON® M90™ | HOSTAFORM® LX90Z | |
|--|--------------|------------------|------------------------|
| Physical properties | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Density | 1410 | 1430 | kg/m ³ |
| Melt volume rate (MVR) | 8 | 8 | cm ³ /10min |
| MVR test temperature | 190 | 190 | °C |
| MVR test load | 2.16 | 2.16 | kg |
| Mold shrinkage - parallel | 2 | 2.3 | % |
| Mold shrinkage - normal | 1.9 | 1.4 | % |
| Water absorption (23°C-sat) | 0.75 | 0.75 | % |
| Humidity absorption (23°C/50%RH) | 0.2 | 0.2 | % |
| Mechanical properties | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Tensile modulus (1mm/min) | 2760 | 2700 | MPa |
| Tensile stress at yield (50mm/min) | 66 | 54 | MPa |
| Tensile strain at yield (50mm/min) | 10 | 10 | % |
| Tensile creep modulus (1h) | 2450 | - | MPa |
| Tensile creep modulus (1000h) | 1350 | - | MPa |
| Flexural modulus (23°C) | 2550 | 2850 | MPa |
| Charpy impact strength @ 23°C | 188.0 | - | kJ/m ² |
| Charpy impact strength @ -30°C | 181.0 | - | kJ/m ² |
| Charpy notched impact strength @ 23°C | 6.0 | 5.0 | kJ/m ² |
| Charpy notched impact strength @ -30°C | 6.0 | 4.0 | kJ/m ² |
| Notched impact strength (Izod) @ 23°C | 5.7 | - | kJ/m ² |
| Thermal properties | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Melting temperature (10°C/min) | 165 | 166 | °C |
| DTUL @ 1.8 MPa | 101 | 88 | °C |
| DTUL @ 0.45 MPa | 158 | - | °C |
| Vicat softening temperature B50 (50°C/h 50N) | 161 | - | °C |
| Coeff.of linear therm. expansion (parallel) | 1.2 | 0.9 | E-4/°C |
| Coeff.of linear therm. expansion (normal) | 1.2 | 1 | E-4/°C |
| Electrical properties | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Volume resistivity | 8E12 | - | Ohm*m |
| Surface resistivity | 3E16 | - | Ohm |
| Test specimen production | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Processing conditions acc. ISO | 9988-2 | 9988-2 | - |
| Rheological Calculation properties | | | |
| | Value | Value | Unit |
| Density of melt | 1200 | - | kg/m ³ |
| Thermal conductivity of melt | 0.155 | - | W/(m K) |
| Specific heat capacity of melt | 2210 | - | J/(kg K) |
| Eff. thermal diffusivity | 4.85E-8 | - | m ² /s |
| Ejection temperature | 165 | - | °C |

Tabla 4.1.- Comparación entre las propiedades del CELCON y el HOSTAFORM, marca Celanese[1].

Al final del capítulo se habrán descrito las tres alternativas siguientes: Alternativa empírica para la optimización del proceso, alternativa de obtención de datos del simulador de flujo y alternativa por moldeo científico y DoE.

Alternativa empírica para la optimización del proceso

Las micro y pequeñas empresas (que generalmente son familiares) optimizan su proceso mediante la experiencia de los operarios y bajo la prueba del molde o prueba de material, esto trae como consecuencia el trabajar a tiempos muy prolongados y muchas veces costosos tanto para el inicio del proceso como durante el proceso como tal.

En esta alternativa la máquina se programa con los parámetros de operación de manera aproximada y bajo la experiencia del operario; es decir, se procede a ingresar los parámetros que empíricamente se han obtenido a partir de otros moldes semejantes y/o parámetros proporcionados por el distribuidor del material.

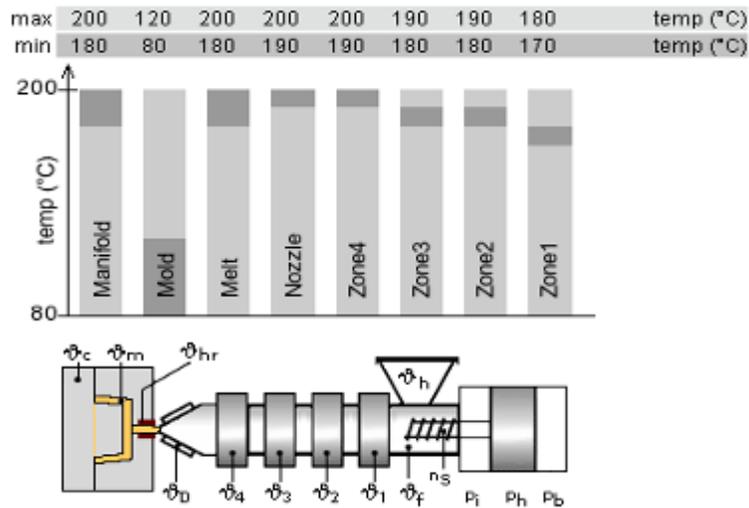
Una vez ingresados estos valores, se comienzan a variar los parámetros conforme van formándose las piezas acorde a los defectos encontrados sin dejar que se estabilice la máquina, en ocasiones, el personal al frente de este proceso no espera a que los cambios hechos se reflejen en la pieza, empezando a acarrear errores de apreciación.

Una vez que la pieza, aparentemente, no tiene defectos, se dice que la optimización está realizada y se continúa con la producción; como la evaluación es de apariencia, muchas veces existe una ignorancia en los temas mencionados en los capítulos anteriores de este trabajo, trayendo como consecuencia que las máquinas, moldes, sistemas de enfriamiento y calidad de las piezas, empiecen a verse afectadas, tanto por el sobre trabajo de las propias máquinas, como en las propiedades de la pieza. Para un mejor control de ello, se aplican controles de calidad, documentando los parámetros y la calidad de las piezas, una vez hecho lo anterior, se guardan en archivo los parámetros y se identifican como “parámetros de la muestra maestra”.

Para este trabajo, se utilizó un material de ingeniería, previamente conocido en otras aplicaciones dentro del Laboratorio de plásticos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM; en este caso se utilizó el material de acetal CELCON M90, para con ello identificar los parámetros críticos de procesamiento que se presentan en el molde que se estaba estudiando. Posteriormente se utilizaron los parámetros anteriores para el acetal HOSTAFORM, de la misma marca Celanese-Ticona, dado que el material era de nuevo ingreso al mercado, y solo se contaba con la ficha técnica general. Como ambos materiales son de la misma familia, ésto se realizó con el propósito de verificar la disparidad entre los parámetros críticos de proceso de ambos materiales para un mismo molde y las disparidades entre las alternativas que se presentan en este trabajo. En las tablas 4.2 y 4.3 se muestran los parámetros de proceso de acuerdo a las fichas técnicas generales de cada material.

Parámetros del procesamiento recomendados por el fabricante.

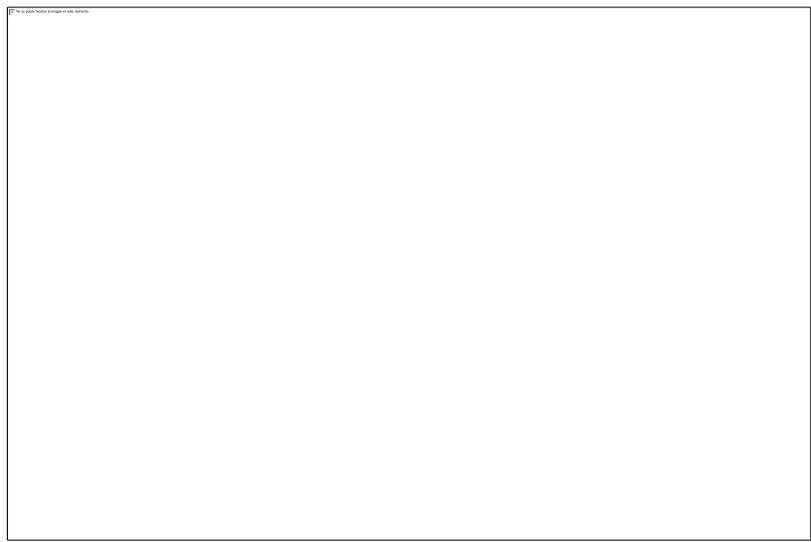
- Celcon M90.



| | |
|--------------------------------|-------------|
| Velocidad de inyección | Lento-medio |
| Tiempo de secado (h) | 3 |
| Temperatura de secado (°C) | 80-100 |
| Presión de inyección (bar) | 600-1200 |
| Presión de sostenimiento (bar) | 600-1200 |
| Contra presión (bar) | 0-5 |

Tabla 4.2.- Parámetros del Celcon M90 (www.ticona.com)

- Hostaform LX90Z



| | |
|--------------------------------|-------------|
| Velocidad de inyección | Lento-medio |
| Tiempo de secado (h) | 3 |
| Temperatura de secado (°C) | 80-100 |
| Presión de inyección (bar) | 600-1200 |
| Presión de sostenimiento (bar) | 600-1200 |
| Contra presión (bar) | 0-5 |

Tabla 4.3.- Parámetros del Hostaform LX90Z (www.ticona.com)

Bitácora de proceso para el CELCON M90

Primero se secó el material a una temperatura de 80°C durante 3 horas, tomándose una muestra para medir su humedad después del tiempo transcurrido. Se midió la humedad de la muestra en un analizador de humedad modelo MARK2 HP Moisture Analyzer de la marca Omnimark Instrument Corp., el resultado fue de 0.008%, valor menor al recomendado por la literatura que es de 0.2% o menor a este valor [4].

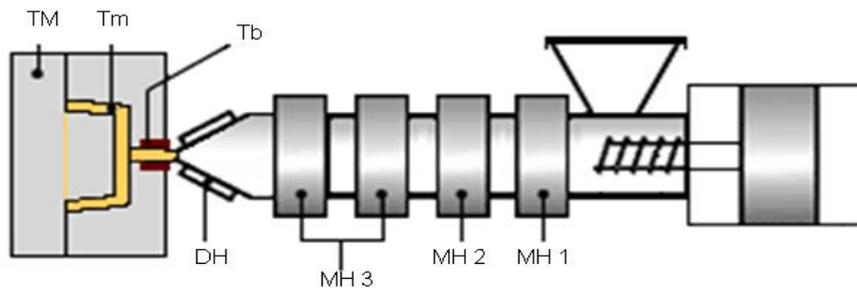
Una vez seco el material, se inició el proceso de inyección ingresando los valores proporcionados por la ficha técnica, y considerando una velocidad de inyección intermedia en relación a su capacidad máxima de 119 mm/s. la presión posterior se obtuvo considerando el 75% de la presión de inyección y tomando en cuenta el punto de conmutación para definir el tiempo de presión posterior, la tabla 4.4 muestra las condiciones iniciales obtenidas del controlador de la máquina de inyección.

Condiciones iniciales (datos tomados del ibed de la máquina ergo tech pro 50-270):

| | | |
|-----------------------------|------|--------|
| Tiempo de control de ciclo | 55 | [s] |
| Tiempo de inyección | 1 | [s] |
| Tiempo de dosificación | 7 | [s] |
| Presión de inyección | 1200 | [Bar] |
| Velocidad de inyección | 60 | [mm/s] |
| Tiempo de presión posterior | 4 | [s] |
| Presión posterior | 750 | [Bar] |
| Tiempo de enfriamiento | 30 | [s] |
| Revoluciones | 200 | [rpm] |
| Retroceso | 65 | [ccm] |
| Parada de dosificación. | 65 | [ccm] |
| Cojín de masa | 2 | [ccm] |
| Contrapresión | 30 | [Bar] |

Tabla 4.4.- Condiciones iniciales del proceso.

Temperaturas iniciales



| TM | Tm | Tb | DH | MH 3 | MH 2 | MH 1 | |
|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| 40 | 193 | 300 | 195 | 195 | 185 | 185 | °C |

Cabe mencionar que la temperatura en el bebedero, (T_b), se consideró con un valor alto, con el propósito de asegurar que el material no se enfriara durante el trayecto dentro del bebedero, de lo contrario el punto de inyección se tapa.

Se determinó usar una presión de inyección máxima indicada por el proveedor para asegurar el llenado al 90% de las cavidades.

En los primeros disparos se obtuvieron perillas con rebabas y el extremo de la vela salía con hilo (Figura 4.13), se procedió a bajar la temperatura del bebedero en intervalos de 10°C hasta que el hilo se desapareciera, a la temperatura de 250°C . Para quitar las rebabas, se disminuyó la presión posterior de 750 a 700[Bar]. Se observó que con estos nuevos parámetros, la colada se quedaba del lado móvil, por lo que se procedió a modificar la presión de expulsión. Después de realizar varios ciclos, se observó que el hilo se desprendía con la colada y la pieza se expulsaba del molde apropiadamente.



Figura. 4.1 .- Hilo de la pieza

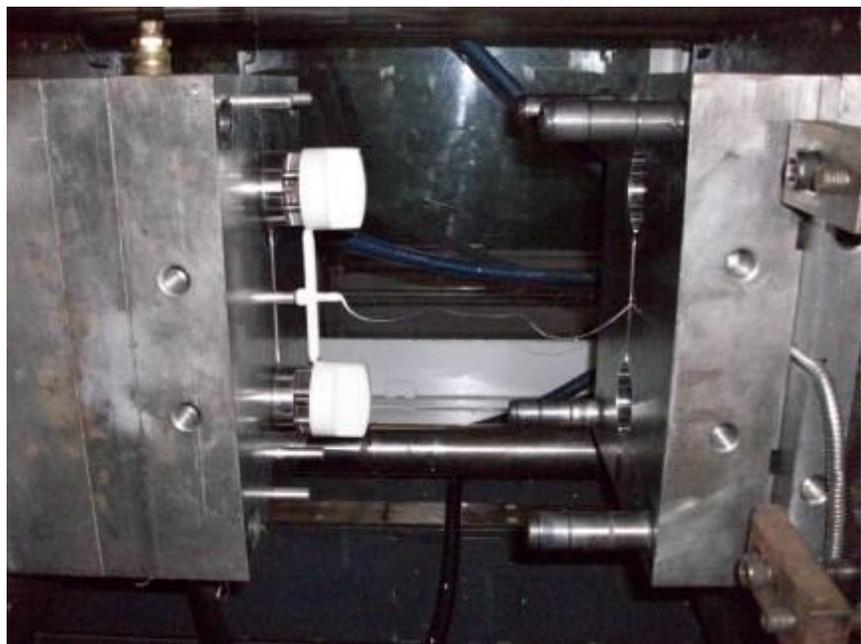


Figura. 4.2 .- Pieza no expulsada del molde.

En cuanto a la apariencia, se observó que se marcaba de manera profunda la línea de soldadura por lo que se procedió a disminuir la velocidad de inyección en los siguientes intervalos: 50, 45, 40, 35 mm/s y se aumentó la temperatura del molde de 40 a 50°C , con ello, la profundidad de la línea de soldadura disminuyó.

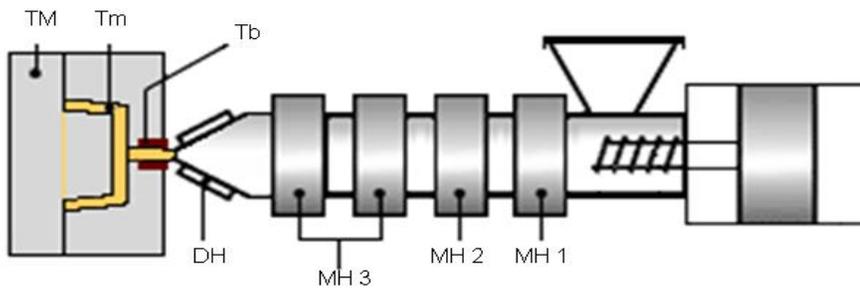
Con estos parámetros que se modificaron, las piezas que se obtuvieron, eran aceptables de acuerdo a su apariencia. Se hizo una serie de 50 ciclos, para verificar que la máquina no alterara los valores predeterminados en sus parámetros; al no encontrar cambios se procedió a realizar el ciclo de inyección de una producción piloto. Los parámetros finales se indican en la tabla 4.5.

Parámetros finales

| | | |
|-----------------------------|------|--------|
| Tiempo de control de ciclo | 38.5 | [s] |
| Tiempo de inyección | 1.11 | [s] |
| Tiempo de dosificación | 7.63 | [s] |
| Presión de inyección | 730 | [Bar] |
| Velocidad de inyección | 35 | [mm/s] |
| Tiempo de presión posterior | 4 | [s] |
| Presión posterior | 739 | [Bar] |
| Tiempo de enfriamiento | 30 | [s] |
| Revoluciones | 150 | [rpm] |
| Retroceso | 57.8 | [ccm] |
| Parada de dosificación. | 52.5 | [ccm] |
| Cojín de masa | 2 | [ccm] |
| Contrapresión | 50 | [Bar] |

Tabla 4.5.- Parámetros finales.

Temperaturas finales



| TM | Tm | Tb | DH | MH 3 | MH 2 | MH 1 | |
|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| 50 | 197 | 250 | 200 | 200 | 190 | 190 | °C |

Hostaform LX90Z

Para inyectar éste material se tomaron los valores determinados para el CELCON M90, ya que son materiales de la misma clase. Siguiendo el mismo procedimiento, se seco el material a una temperatura de 80°C durante 3 horas con un valor de humedad resultante de 0.038%.

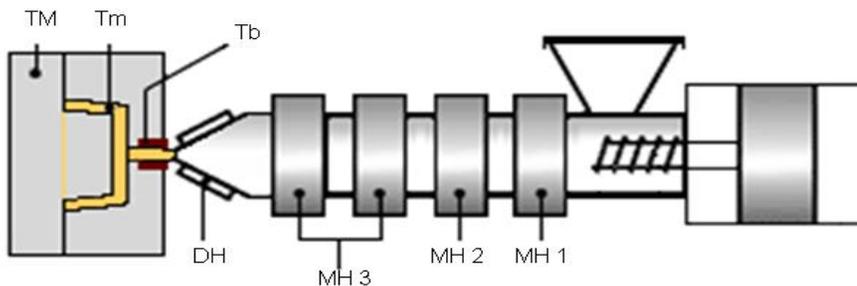
Siendo el Hostaform LX90Z, un material de apariencia metálica de la familia de los acetales, el fabricante sugirió que se cambiara la geometría de los puntos de inyección con el argumento de que aparecerían manchas mate en las líneas de unión, ambos defectos serían los que se evaluarían en este trabajo. La tabla 4.6 muestra los valores iniciales de los parámetros de proceso.

Valores iniciales (tomados de la máquina Ergo Tech Pro 50-270)

| | | |
|-----------------------------|------|--------|
| Tiempo de control de ciclo | 38.5 | [s] |
| Tiempo de inyección | 1.11 | [s] |
| Tiempo de dosificación | 7.63 | [s] |
| Presión de inyección | 730 | [Bar] |
| Velocidad de inyección | 35 | [mm/s] |
| Tiempo de presión posterior | 4 | [s] |
| Presión posterior | 739 | [Bar] |
| Tiempo de enfriamiento | 30 | [s] |
| Revoluciones | 150 | [rpm] |
| Retroceso | 57.8 | [ccm] |
| Parada de dosificación. | 52.5 | [ccm] |
| Cojín de masa | 2 | [ccm] |
| Contrapresión | 50 | [Bar] |

Tabla 4.6.- Parámetros iniciales.

Temperaturas iniciales



| TM | Tm | Tb | DH | MH 3 | MH 2 | MH 1 | |
|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| 50 | 197 | 250 | 200 | 200 | 190 | 190 | °C |

Con los comentarios del fabricante de la resina, se llevaron a cabo varios ciclos de inyección y se observó que las piezas presentaban solamente dos defectos: línea de unión muy marcada y manchas mate en el punto de inyección.

Considerando los defectos marcados, se comenzó a manejar un perfil de velocidades, ya que al disminuir la velocidad a la entrada del bebedero, se tiene un control de los defectos de apariencia. Las velocidades fueron de 20 mm/s al inicio y 15 mm/s a la mitad de la inyección, notándose que la línea de unión ya no era tan marcada, por lo que se continuó bajando la velocidad hasta llegar a 5 mm/s de inicio y a la mitad de la inyección de 1 mm/s; sin embargo, se seguían presentando la misma marca de unión de material y la mancha en el punto de inyección, por lo que se manejó solamente una sola velocidad que en este caso fue la más baja que maneja la máquina, 1 mm/s. Aunque los defectos de manchas mate y líneas de soldadura fueron menos marcados, si se compara las piezas obtenidas con las del CELCON M90, no se lograron obtener beneficios sustanciales.

Con los resultados obtenidos en la sección anterior, se planteó la forma tradicional de manejar los parámetros de inyección en el llenado de cavidades, se describió de una manera sencilla el comportamiento del material al modificar cada uno de los parámetros, sus problemas y soluciones. En la siguiente sección se describirá la obtención de los parámetros de proceso partiendo de los datos de un simulador de flujo para el llenado de cavidades.

Alternativa de obtención de datos del simulador de flujo

El programa que se utilizó para ver el comportamiento del flujo dentro de las cavidades del molde fue el mold flow, donde se observaron los puntos críticos de posibles zonas de defectos. El simulador de flujo determina, entre otros, el balanceo de las cavidades, caídas de presión, aire atrapado.

El modelo sólido se obtuvo a través del software Unigraphics, con exportación al programa de simulación de flujo, en este caso mold flow para que se pudiera simular la ruta del fluido hasta el llenado completo de la cavidad y así hacer el análisis de su comportamiento. En la figura 4.7 se muestra el modelo sólido de la perilla que se trabajó durante la etapa experimental de este trabajo.

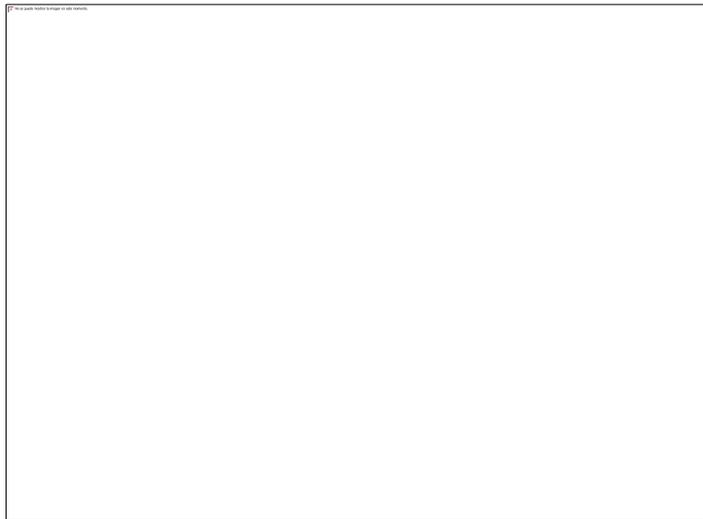


Figura 4.7.- Modelo sólido de la pieza, “perilla”, obtenida del software Unigraphics.

De las figuras 4.8 a la 4.17 se muestran los resultados arrojados por el software mold flow respecto al llenado de las cavidades y sus respectivos análisis. La figura 4.8 muestra el modelo transparente de las piezas a obtener. Lo contrario sucede con la figura 4.9, donde se muestra únicamente el modelo sólido de las piezas.

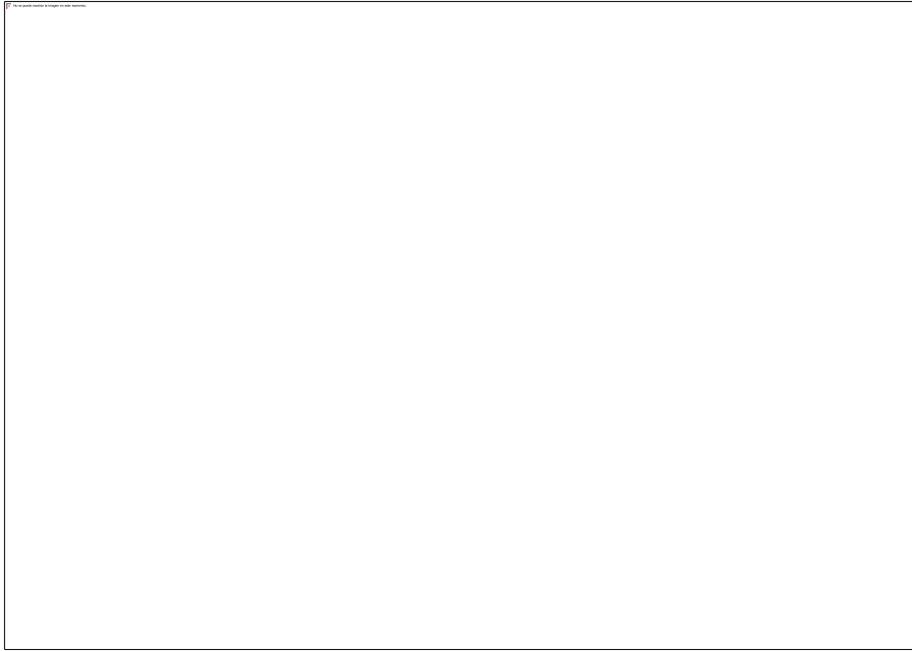


Figura 4.8.- Modelo transparente.

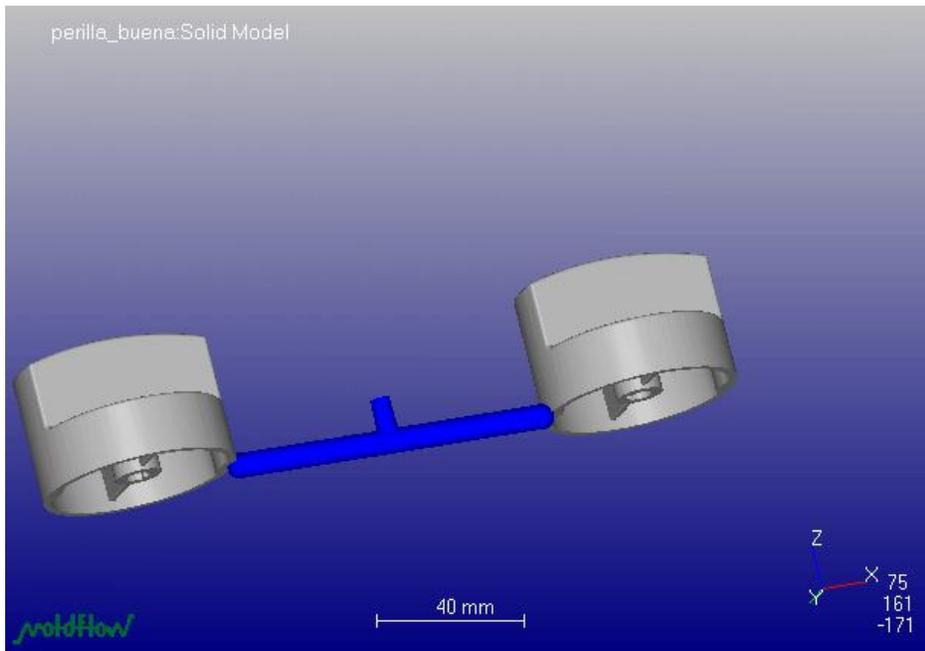


Figura 4.9.- Modelo solido.

La figura 4.10 muestra el tiempo de llenado de las cavidades que resultó ser con un valor máximo de 2 segundos, mientras que la figura 4.11 muestra la confiabilidad en el llenado, que es alta. En la figura puede apreciarse el completo llenado de las piezas. Cabe señalar que en la figura 4.10 se presenta tiempos de llenado diferentes para cada cavidad como lo muestra la coloración amarilla.

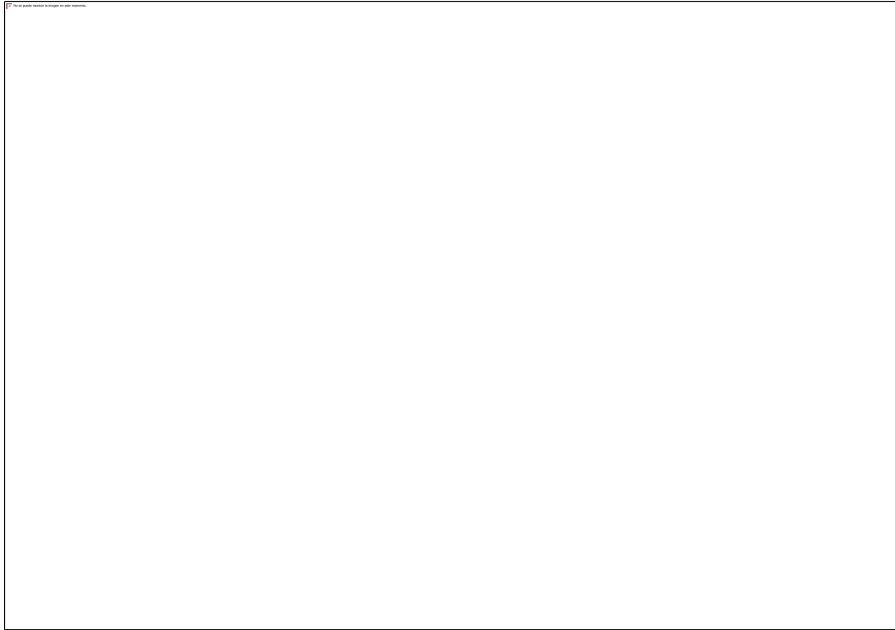


Figura 4.10.- Tiempo de llenado

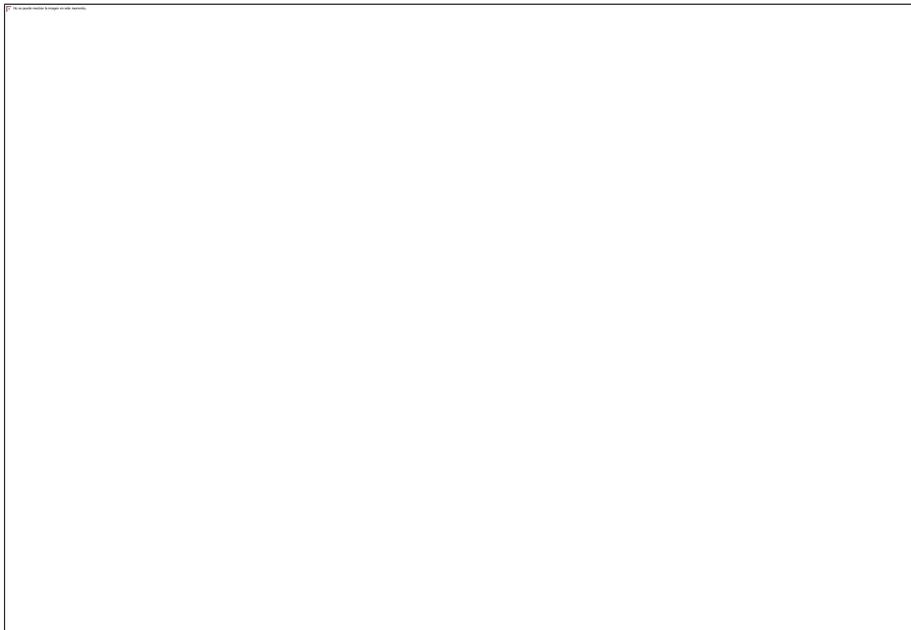


Figura 4.11.-Seguridad de llenado.

La figura 4.12 predice la calidad de las piezas después del llenado. Como puede apreciarse la calidad muestra una desviación sobre el centro de la parte superior de la pieza, así como al final del llenado de la misma, (zonas de color amarillo).

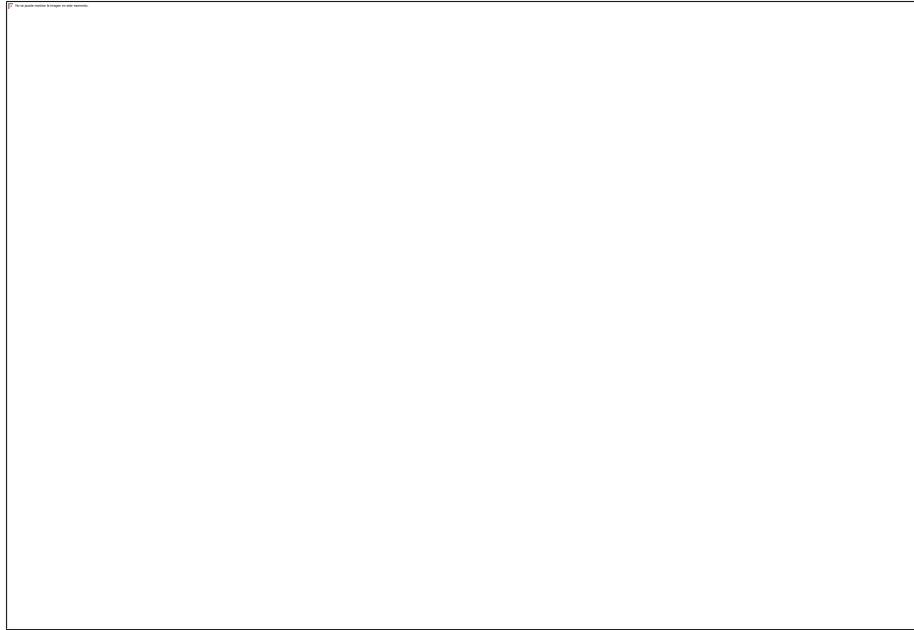


Figura 4.12.- Predicción de la calidad de la pieza.

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran la presión de inyección y la caída de presión respectivamente, en donde se observa que la presión de inyección necesaria para el llenado total de las piezas es de 17.91 MPa.

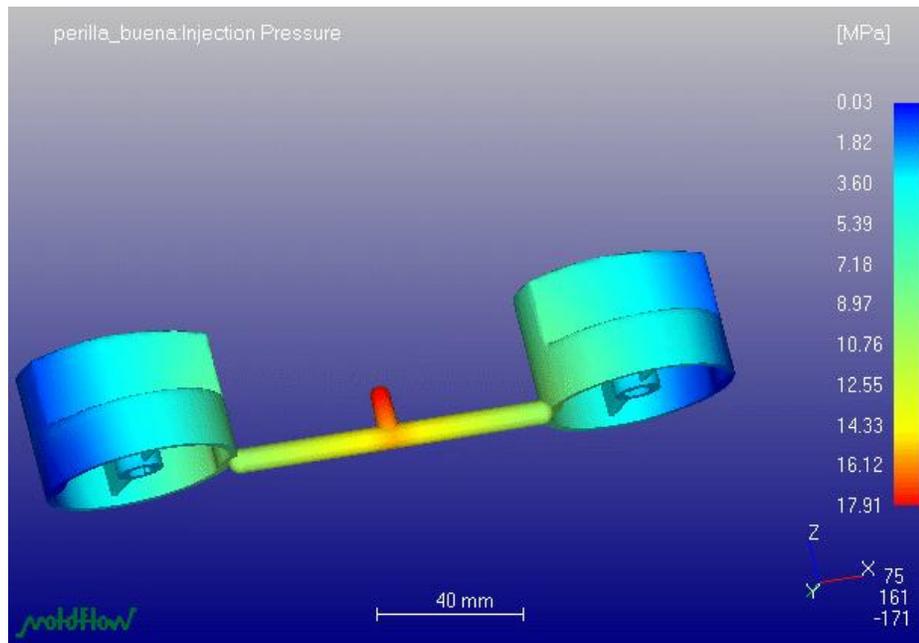


Figura 4.13.- Presión de inyección

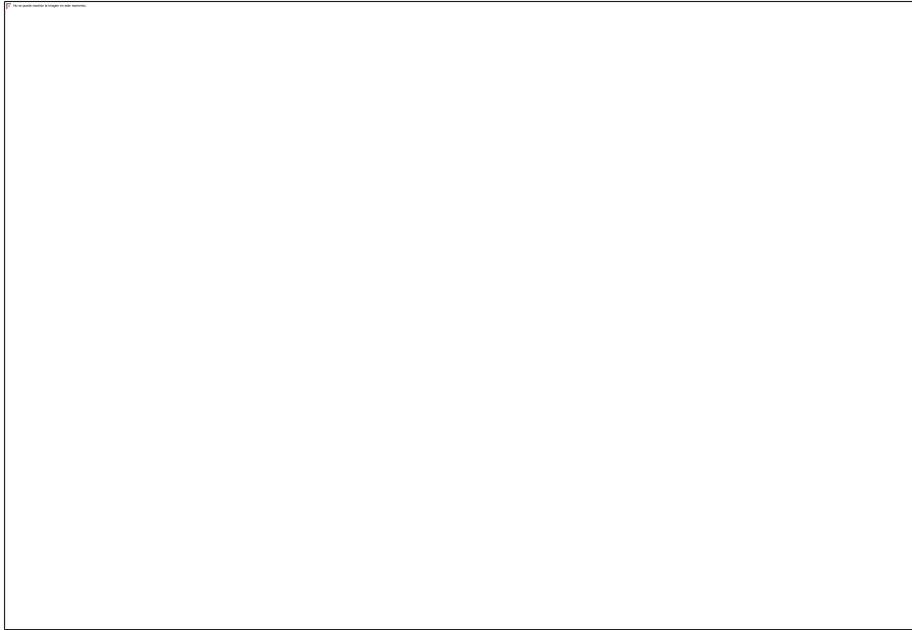


Figura 4.14.- Caída de presión.

La figura 4.15 muestra la temperatura del frente de flujo durante el llenado arrojando un valor máximo de 181.47°C . La que indica las zonas de la pieza que se van enfriando hasta llegar al final del llenado.

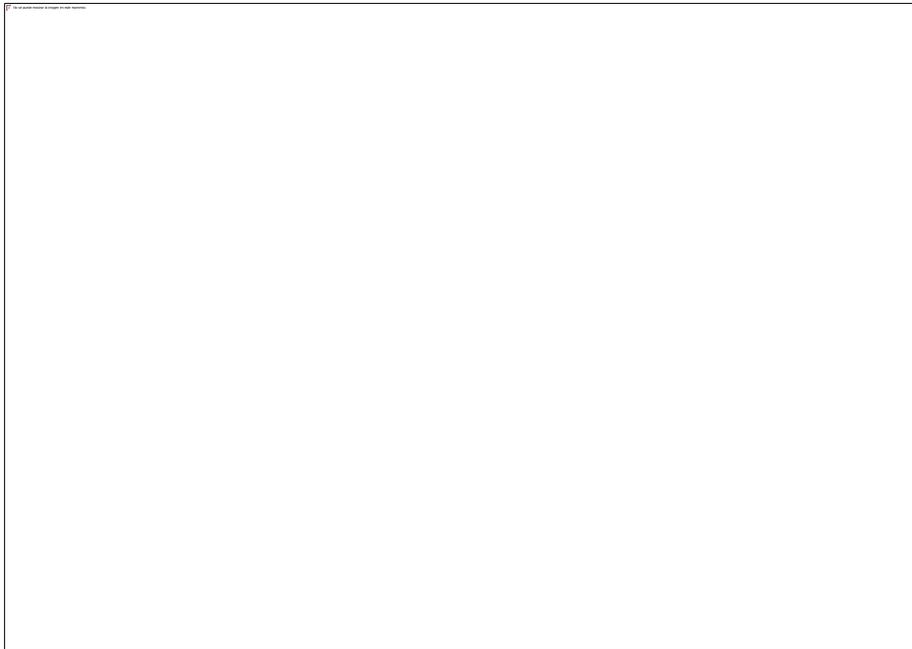


Figura 4.15.-Temperatura del frente de flujo.

Las figuras 4.16 y 4.17 representan la posibilidad de defectos en las piezas. En la primera se observan las posibles líneas de unión mientras que en las segunda se muestran la posibilidad del aire atrapado.

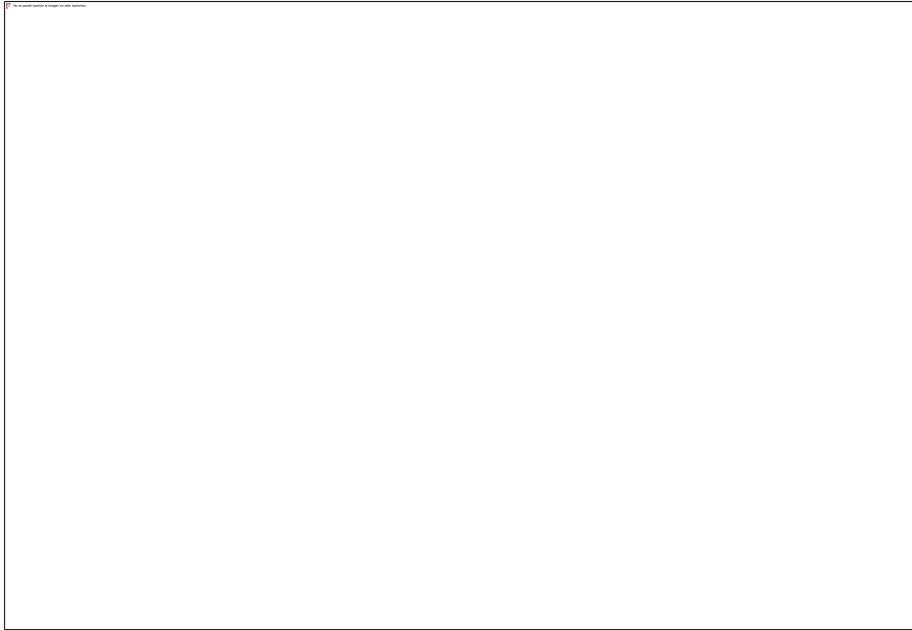


Figura 4.16.- Líneas de unión.

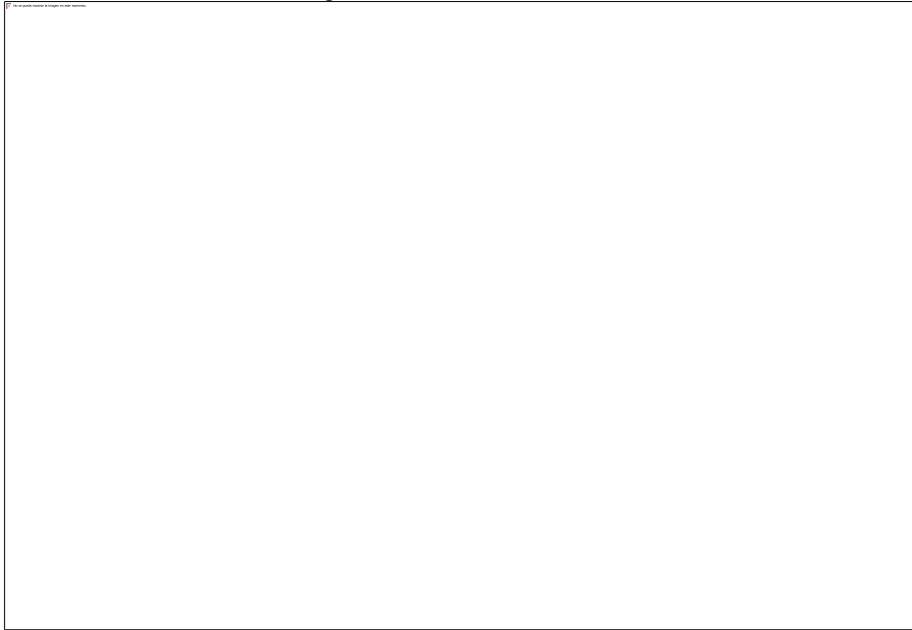


Figura 4.17.- Atrape de aire.

En general, a partir de la simulación podemos decir que las cavidades se llenaron completamente, que se tendrán defectos o problemas en el punto de inyección y en la unión de soldadura de las piezas, según las figuras 4.12 y 4.16; con los resultados de la figura 4.17 se pensaría poner salidas de gases, viendo el aire atrapado al interior de la pieza y en la unión del material.

La simulación da información sobre el comportamiento del flujo dentro de las cavidades que se asemejan al proceso real, pero se observa, que hay que tener cuidado con los valores presentados por el simulador; ya que por ejemplo, mold flow presenta una presión de llenado de 17.91 MPa, siendo que la ficha técnica marca un intervalo entre 60-120 MPa y en la sección de este trabajo

titulada alternativa empírica para la optimización del proceso, los valores se encuentran dentro del intervalo determinado por esta última alternativa.

Para el caso de la simulación con el material Hostaform LX90Z, ésta no pudo realizarse debido a que no se encontraron los datos iniciales, ficha técnica, dentro de la librería del software. Por ello se decidió considerar los mismos parámetros que para el Celcon M90 a sabiendas de que él Hostaform es un acetal, al igual que el Celcon, pero con diferencia que lleva una carga metálica como aditivo y que esto cambiaría las condiciones de operación.

Alternativa por moldeo científico y Diseño de Experimentos (DoE).

En la actualidad existe una nueva alternativa para llevar a cabo una secuencia o pasos a seguir durante el establecimiento de parámetros para el proceso de inyección, el moldeo científico tiene la finalidad de definir las principales variables al mismo tiempo que se pudieran corregir los defectos que pudieran presentarse en las piezas.

El moldeo científico se basa en obtener datos durante el proceso de inyección, los que servirán para tomar decisiones, cuando la pieza se está formando; y en un segundo paso, si las piezas siguen teniendo una calidad deficiente, se pueda formular un Diseño de Experimento DOE (por sus siglas en inglés Design of Experiments), que permita mejorar la calidad de las piezas.

A continuación se describen de manera detallada los pasos a seguir durante el llamado moldeo científico, metodología aplicada por Bozzeli y Kulkarni en 2004. [2].

Generación de la curva de viscosidad. Los siguientes pasos se siguen para crear una curva de viscosidad que permita tener una relación entre la velocidad de inyección y su relación con la viscosidad aparente, como efecto de los cambios en la velocidad de inyección.

1. La temperatura se establece a la mitad del intervalo que indica la ficha técnica.
2. Se establecen todos los parámetros en cero presiones, tiempos, etc., excepto los parámetros de la fase de inyección.
3. Ajustar la presión de inyección hasta el máximo disponible por la máquina.
4. Establecer el tiempo de enfriamiento en un valor seguro para que la pieza pueda caer.
5. Establecer la velocidad de inyección en un valor mínimo permisible por la máquina, e iniciar el primer ciclo. La pieza debe de llenarse al 50%.
6. Aumentar la velocidad hasta llegar a un valor de velocidad “máximo”; si la pieza no llena al 95% de la cavidad, mover el punto de transferencia (punto de conmutación).
7. Hacer un disparo para llenar la cavidad y anotar la presión máxima para el llenado.
8. A continuación se baja la velocidad en un intervalo pequeño, por ejemplo de 5 [mm/seg] a 4.5 [mm/seg] o del 90% al 80%. Tener en cuenta el tiempo de llenado y la presión de inyección máxima.
9. Repetir el paso anterior hasta que al final se llegue a la velocidad más baja posible de inyección.
10. Establecer los puntos de la gráfica en más de 10 mediciones, lo recomendable es hacer 12 ciclos, para atenuar la curva.
11. Para obtener la viscosidad, utilizar la siguiente ecuación a:
Viscosidad aparente en el punto máximo = presión máxima X tiempo de llenado X Razón de intensificación.

De la información obtenida se pueden graficar los datos obtenidos de velocidad de inyección, vs viscosidad aparente para determinar el efecto de la velocidad de inyección sobre la viscosidad aparente del material en estudio. En la figura 4.18 se observa una curva de hipotética, tomada de: S.Kulkarmi, Robust Process Development and Scientific Molding, 1 ar ed. Asia Pasific Buisness Press. Inc, 2012.

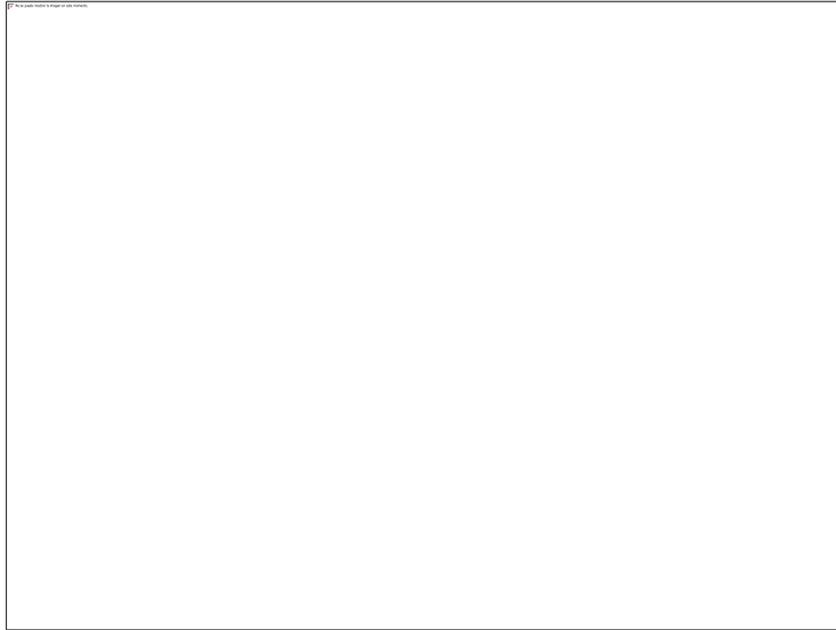


Figura 4.18.- Curva de viscosidad aparente vs Velocidad de inyección [2]

Para esta figura hipotética, se puede observar que la viscosidad se mantiene constante después de aproximadamente 60% de la velocidad de la inyección. Por lo tanto, puede pensarse que establecer la velocidad de la inyección en un 70%, aseguraría que la etapa de llenado del proceso se mantendrá constante.

Procedimiento para estimar el balance de la cavidad. Cuando se tiene un molde de dos o más cavidades, el llenado debe ser simultáneo para evitar diferencias en pesos de las piezas. Para ello, se requiere:

1. Con los parámetros establecidos en el paso anterior, y la velocidad de inyección obtenida en la curva de viscosidad, se establecen los parámetros de segunda presión partiendo de cero.
2. Establecer el tiempo de enfriamiento a un valor para que la pieza esté lo suficientemente fría como para expulsar.
3. Ajuste la velocidad de inyección para el valor obtenido del estudio de la curva de viscosidad.
4. Sólo mediante el ajuste de la posición de transferencia, moldear piezas cortas, es decir sin llenar.
5. Hacer tres tiros y tomar el peso promedio de cada cavidad y trazar un gráfico que permita ver la variación de peso de las piezas provenientes de las distintas cavidades, (Figura.- 4.19).

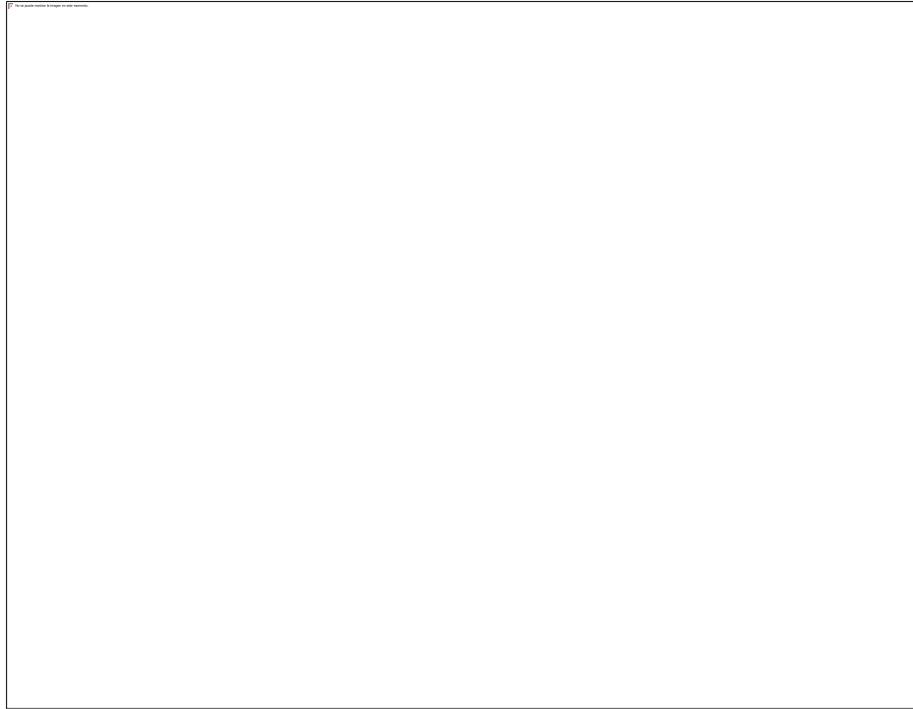


Figura. 4.19.- Gráfico de peso en 8 cavidades. Cada barra representa una cavidad.[2]

La variación porcentual no debe de pasar el 5%, para piezas que requieren una tolerancia muy pequeña, la diferencia no debe ser mayor al 3%, cabe mencionar que el venteo de cada pieza debe de ser la misma de lo contrario puede existir un des-balanceo.

Caída de presión. La presión que se ejerce en las cavidades tiende a variar al paso del flujo, por ello es conveniente determinar la presión de inyección a lo largo del recorrido del flujo a través del molde en diferentes puntos. Indica que los puntos adecuados para realizar este procedimiento pueden ser las siguientes secciones:

La boquilla de la máquina, el bebedero, el corredor principal, el corredor secundario, el punto de inyección y el fin de la pieza. El procedimiento para determinar la caída de presión al frente de la máquina es el siguiente.

1. Configurar el equipo para la máxima presión disponible.
2. Establecer un ciclo en la máquina de moldeo sin material. Observar la presión máxima de la máquina.
3. Establecer un nuevo ciclo, pero solamente que se llene la vela tomando en cuenta la presión máxima.
4. Moldear la vena principal (si es el caso).
5. Moldear la vena secundaria (si es el caso).
6. Moldear un ciclo de manera que sólo el material llegue hasta el punto de inyección.
7. Moldear un ciclo de manera que llene la pieza.
8. Generar un gráfico que muestre los cambios de presión, como se muestra en la figura 4.20 y buscar las secciones que tienen una caída de presión alta. [2]



Figura. 4.20.- Gráfico de caída de presión.[2]

La gráfica muestra que en la parte de llenado de la pieza es donde se aplica la mayor presión, además se visualiza las presiones que ejerce el material para llegar a cada área del molde, si estas presiones fueran demasiado elevadas, se tendrá que tomar decisiones y corregir el molde para disminuir la presión, por ejemplo si en la vena secundaria existiera una presión mayor que en el llenado de la pieza, es evidente que se tendría que modificar la vena para que la presión disminuya y así disponer de la máxima presión para llenar la pieza completa.

Procedimiento para la construcción de la ventana de proceso: La ventana de proceso es un gráfico que establece límites de presión de sostenimiento y temperaturas, donde el material se puede considerar como un flujo manejable dentro de las cavidades del molde. Para ello se necesita:

1. Ajustar la temperatura del barril para alcanzar el valor más bajo de la temperatura recomendada.
2. Ajustar la velocidad de inyección para el valor obtenido de la curva de viscosidad.
3. Establecer el tiempo de presión posterior a cero.
4. Establezca el tiempo de enfriamiento en un valor seguro.
5. Moldear una pieza al 95-98% de su capacidad.
6. Hacer de 5 a 8 ciclos para estabilizar el proceso.
7. Establecer el tiempo de presión posterior con un valor al que esté seguro que el punto de inyección este sólido. (Más adelante se explicará cómo obtenerlo y optimizarlo) Éste dato se puede tomar de la experiencia del operador, se basa en alguna experiencia anterior con el molde o con otro molde que tenga semejanza en el punto de inyección.
8. Aumentar la presión posterior en forma gradual y fijar la presión en una parte aceptable en la cual no se tengan defectos en la pieza propios de la presión.
9. Tomar nota de esta presión como "de baja temperatura - presión baja "; la cual será una esquina de la ventana de proceso.
10. Aumentar la presión de sostenimiento en incrementos similares y anotarla, hasta llegar a obtener una pieza excedida. Tomar nota de esta presión como "de baja temperatura – alta presión" que va hacer otra esquina de la ventana de proceso.
11. Repetir los pasos (9) y (10), pero en el extremo superior de la temperatura recomendada. Y con las presiones altas y bajas quedando de cómo: "alta temperatura - bajo presión" y "de alta temperatura - alta presión" que serán los otros extremos de la ventana de proceso.

12. Se unen los vértices para generar una ventana y se trazan los puntos medios sobre la misma para obtener el punto central de mejor presión y mejor temperatura de fundido. Figura. 4.21.

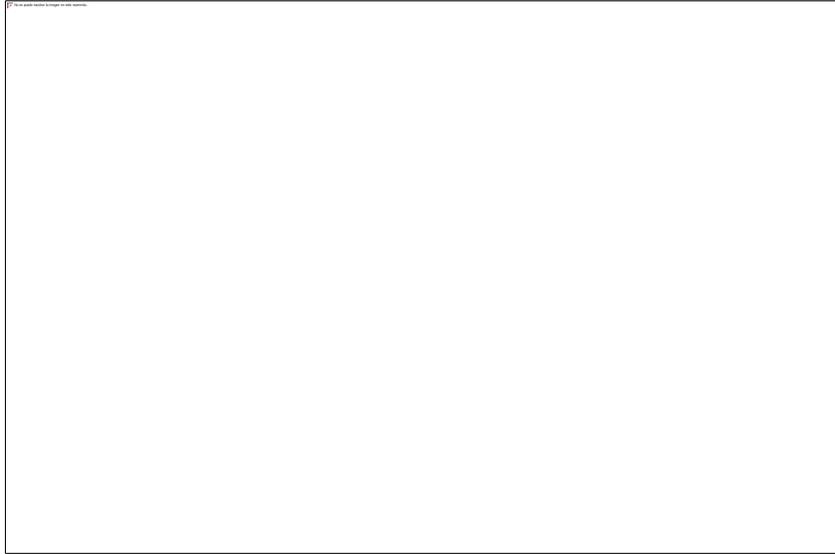


Figura. 4.21.- Ejemplo de una ventana de proceso.

La ventana de proceso es un indicador de cuanto se puede variar la presión y las temperaturas para obtener piezas aceptables.

Tiempo de enfriamiento en el punto de inyección. Determina el cierre del punto de inyección.

1. Ajustar la velocidad basándose en la curva de viscosidad obtenida.
2. Establecer los parámetros en el centro de la ventana de proceso.
3. Establecer el tiempo de enfriamiento en un valor seguro.
4. Poner en cero el tiempo de presión posterior y hacer de 5 a 8 ciclos.
5. Aumentar el tiempo de presión posterior de un segundo y anotarla.
6. Aumentar el tiempo de presión a dos segundos y anotarla. Del mismo modo hacer varios ciclos en incrementos de un segundo.
7. Pesarse las piezas después de cada ciclo y trazar una gráfica (Figura. 4.22) de peso de la pieza en función del tiempo de presión posterior.

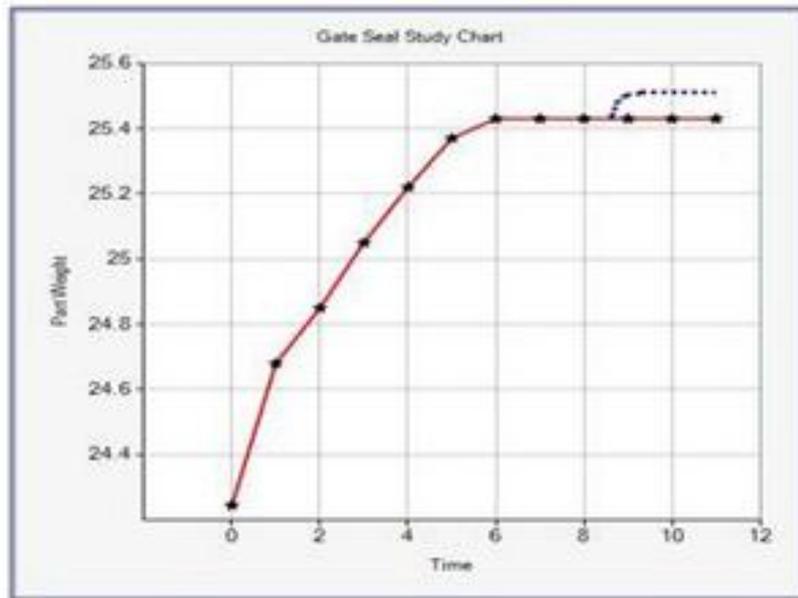


Figura. 4.22.- Curvas de tiempo de presión posterior vs peso de las piezas obtenidas después de terminado el ciclo.

En la figura hipotética se puede observar que a partir de un tiempo de 6 segundos, el peso de la pieza es estable, lo que indica que el punto de inyección se ha cerrado.

Procedimiento para determinar el tiempo de enfriamiento. El tiempo de enfriamiento es el tiempo necesario para que la pieza mantenga las dimensiones estables. Para ello se realizan los siguientes pasos.

1. Realizar tres ciclos en diferentes tiempos de enfriamiento (tomando en cuenta lo descrito en el capítulo 3).
2. Tomar dimensiones geométricas y poner atención a las dimensiones críticas.
3. Trazar una curva de dimensión con respecto al tiempo de enfriamiento.
4. Analizar los datos para ver cómo las dimensiones críticas son influenciadas con el tiempo de enfriamiento.
5. Decidir sobre el tiempo de enfriamiento que mejor se ajusta a las dimensiones.
6. Ejecutar 30 ciclos con este tiempo de enfriamiento y verificar la estabilidad de la pieza con respecto a las dimensiones críticas.

Este tiempo es uno de los más importantes, porque aquí es donde se tiene la mayor parte del tiempo del ciclo además de la calidad de la pieza, aunque lo anterior son para piezas que requieren tolerancias muy estrictas. La figura 4.23 muestra el efecto del tiempo de enfriamiento sobre las dimensiones de la pieza terminada [2].

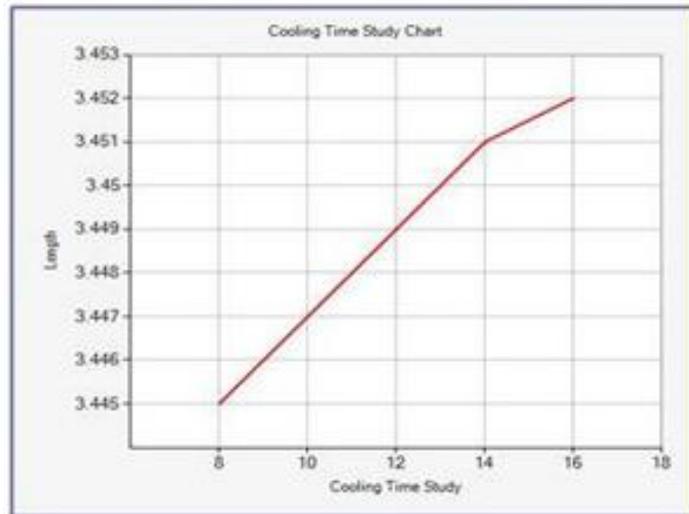


Figura. 4.23.-Tiempo de enfriamiento vs. Dimensión de una pieza[2].

Una vez establecidos los parámetros de la máquina a través del moldeo científico, La información obtenida de la optimización del proceso se respalda con el proceso estadístico de diseño de experimentos (DoE) que se describirá a continuación.

Una vez conocidos los pasos anteriores, se procedió a su aplicación en el estudio del molde de las perillas. Primero se secó el material durante 3 [hrs] a 80 [°C] en un horno de tipo mufla marca RIOS.ROCHA S.A. modelo EC-51 (ver Figura 5.1).



Figura 4.24.- Horno tipo mufla marca RIOS.ROCHA S.A. modelo EC-51 para secar el material.

El tiempo y la temperatura que se emplearon fueron dictados por la ficha técnica.

Una vez seco el material, se procedió a poner en marcha la máquina de inyección de plásticos considerando las siguientes condiciones:

-Cálculo de la fuerza de cierre del molde:

Para el cálculo de la fuerza de cierre se ocupa la ecuación 1 del capítulo 3.

$$FC = P_{media} \times AreaP \times KM \times KS$$

Donde la presión media se obtiene de la Figura. 3.17 de valores experimentales proporcionados en la misma figura y considerando un valor entre 200-1000 [KPa/cm²]

El área proyectada se calculó como:.

$$Area_p = 2 (\pi r^2) = 2 \pi (2.7 [cm])^2 = 45.8 [cm]^2$$

El factor KM se obtiene de la tabla:

| Coeficiente corrector KM | |
|--------------------------|---------------------------|
| KM = 1 | para PA, PE, PS |
| KM = 1.5 | para SAN, ABS, CA, POM SB |
| KM = 2 | para PC, PMMA, PPO, PVC |

(Cap. 13 Análisis del proceso de inyección A. Gordillo 2007)

Sustituyendo valores en la ecuación de la fuerza de cierre Fc tenemos:

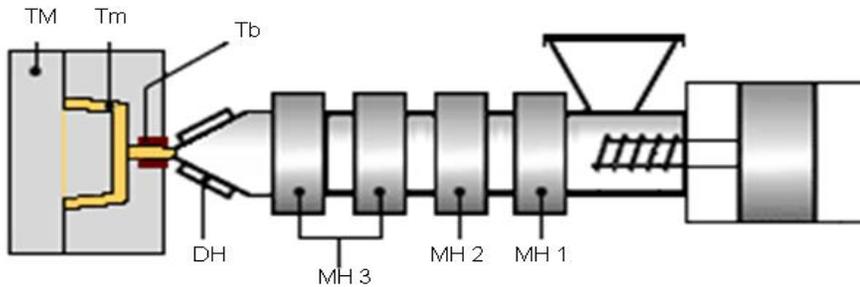
$$FC = (600 [Kg/cm^2]) (45.8 [cm]^2) (1.5 [1]) (1.1 [1]) = 45,342 [Kg] = \mathbf{45 [Ton]}$$

La fuerza de cierre será de 45 toneladas que de acuerdo a la capacidad máxima de la máquina a utilizar es la adecuada. Capacidad máxima de la máquina = 50 [Ton].

-Establecer el perfil de temperaturas:

El perfil de temperaturas asegura una temperatura escalonada a lo largo de la zona de plastificación, dado que cada zona del cañón debe tener su temperatura específica de acuerdo al estado de agregación del material.

En la figura 4.25 se muestran los valores utilizados para cada zona de calentamiento. Estos valores se obtuvieron de manera experimental, que comparados con los obtenidos en el método de moldeo científico, no corresponden a las sugerencias de éste último dado que el método científico indica que los valores de temperatura deben obtenerse como un valor promedio indicados en la ficha técnica, esto debido a que se observó que con estas temperaturas el material tiene buena fluidez al momento de salir de la boquilla, además que un momento dado si se requiere cambiar la temperatura es más fácil aumentarla que disminuirla, quedando de la siguiente manera



| TM | Tm | Tb | DH | MH 3 | MH 2 | MH 1 | |
|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| 92 | 187 | 190 | 190 | 185 | 175 | 172 | °C |

Figura.4.25.- Temperaturas obtenidas de manera experimental.

El molde estaba provisto de un control de temperatura en el bebedero para asegurar una salida de flujo constante. La temperatura en él fue de 250°C, en la Figura, 4.26 se muestra dicho controlador.



Figura 4.26.- Controlador de temperaturas marca SAN HSIN PLASTIC MOLD CO.

-Fijar la velocidad de giro del husillo:

Al no tener un parámetro de velocidad de giro establecido en la ficha técnica. Se determinó utilizar la velocidad empleada en el material CELCON M90. La velocidad de giro del husillo fue de 120 [rpm].

-Fijar la contrapresión:

Se fijo conforme a la ficha técnica, y esta fue de 5 [bar].

-Fijar el tiempo de enfriamiento.

Aplicando la tabla 3.2 proporcionado por el fabricante de la maquinaria se obtuvo el $TE = 4.18 \times s^2$ donde s es el espesor de la pared; por lo tanto $TE = 26$ [s], considerando el arranque del proceso donde no está estabilizada la temperatura del molde y del material se consideró fijar un tiempo de enfriamiento mayor entre 8-10 [s]. Para éste caso se usó un tiempo de 35 [s].

-Fijar la temperatura del molde y resistencias en periféricos.

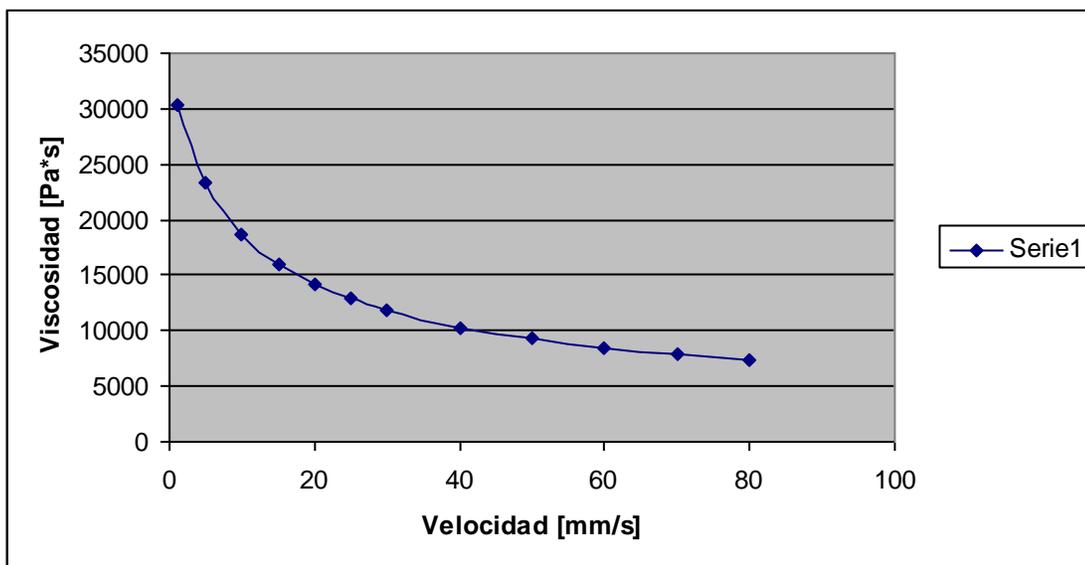
Se fijo la temperatura del molde de acuerdo a la ficha técnica, con una temperatura promedio de 90[°C].

Una vez establecidos los parámetros anteriores se procedió a aplicar el moldeo científico, comenzando por obtener la curva de viscosidad.

Para lo anterior, se presentan los valores de tiempo de llenado, presión posterior y viscosidad que se fueron generando al fijar la velocidad de inyección de acuerdo a los valores presentados en la tabla 4.7. La viscosidad se obtuvo de acuerdo a la siguiente tabla:

| Velocidad de inyección [mm/s] | Tiempo de llenado [s] | Presión de inyección [bar] | Viscosidad [Pa*s] |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| 80 | 0.73 | 1132 | 7437.24 |
| 70 | 0.82 | 1061 | 7830.18 |
| 60 | 0.93 | 1000 | 8370 |
| 50 | 1.09 | 945 | 9270.45 |
| 40 | 1.29 | 876 | 10170.36 |
| 30 | 1.64 | 801 | 11822.76 |
| 25 | 1.89 | 755 | 12842.55 |
| 20 | 2.23 | 708 | 14209.56 |
| 15 | 2.73 | 653 | 16044.21 |
| 10 | 3.51 | 592 | 18701.28 |
| 5 | 4.91 | 526 | 23243.94 |
| 1 | 7.48 | 450 | 30294 |

Tabla 4.7.- Generación de la curva de viscosidad máxima.



Gráfica 4.1.- Curva de viscosidad máxima para el molde de dos cavidades.

Aquí se observa que a partir de 30 [mm/s] el material empieza a comportarse como un fluido Newtoniano, siendo la velocidad de 30 [mm/s] la más baja para aplicar con una viscosidad acorde al flujo que se maneja para el moldeo de los plásticos.

Estimación del balance de cavidades.

De acuerdo a los pasos que se siguen en el moldeo científico, el balance de cavidades es el siguiente paso a realizar. Sin embargo este procedimiento no se llevo a cabo, porque en el molde se tienen dos cavidades y cada cavidad tiene un punto de inyección diferente, con el propósito de conocer el efecto de las entradas en piezas iguales.

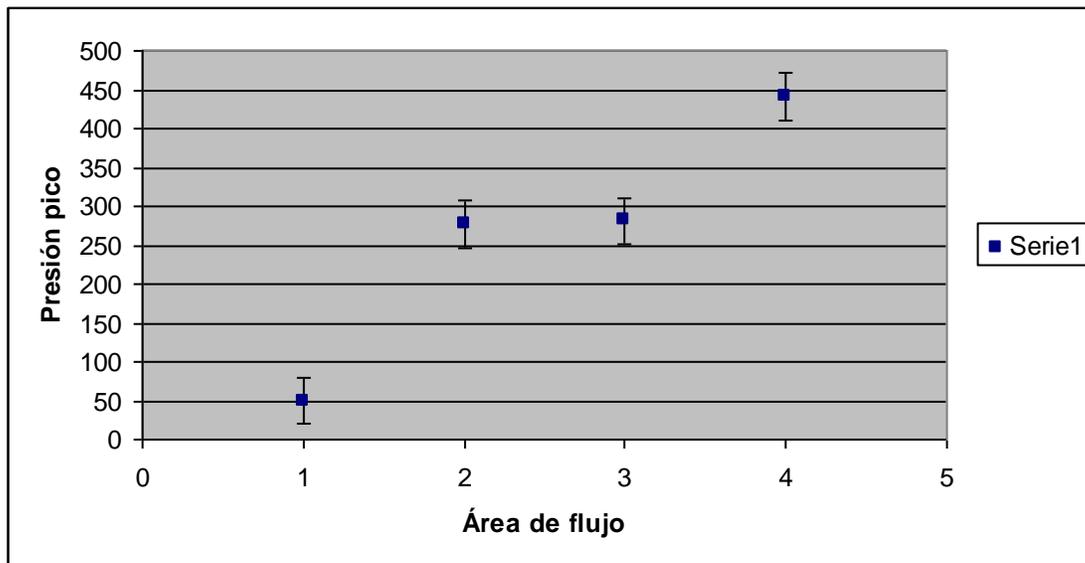
Caída de presión

Como siguiente paso, se evalúa la caída de presión para diagnosticar la presión necesaria para llenar la cavidad y ver que no existan grandes diferencias de presiones a lo largo del recorrido del flujo. En la tabla 4.8 se obtuvieron los datos de caída de presión para la vela, el canal principal y el último punto de la pieza. Cada valor se obtuvo controlando la dosificación del volumen en cada punto de interés y haciendo una observación de la presión pico en el controlador de la máquina.

Caída de presión

| Área de flujo | Presión pico [bar] |
|---------------|--------------------|
| 1 | 50 |
| 2 | 277 |
| 3 | 281 |
| 4 | 441 |

Tabla 4.8.- 1. Presión sin material,2. Vela, 3.Canal principal,. 4. Último punto de la pieza.

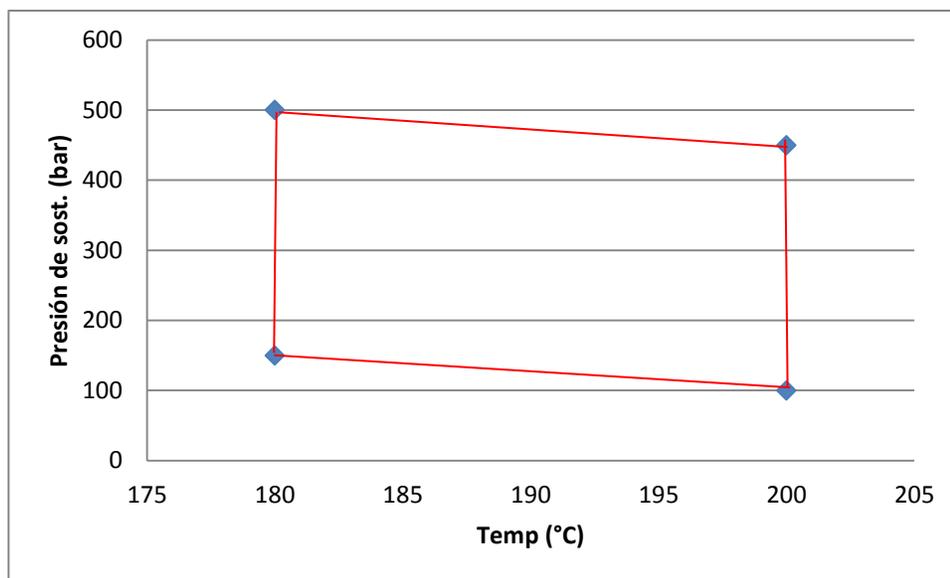


Gráfica 4.2.- Caída de presión en punto de interés.

En la gráfica 4.2 se muestran los valores promedio de cada punto que se evaluó durante la medición de la caída de presión. Es de notarse que para establecer cada punto, se hicieron repeticiones del llenado de la cavidad, obteniéndose valores con variaciones de 5 bares en cada punto. Debe notarse que tanto la vela como el canal principal muestran valores cercanos, dada la cercanía en dimensiones de ambas partes.

Ventana de proceso.

La ventana de proceso se determinó en base a la ficha técnica, esto es, se mantuvieron las temperaturas conforme a lo recomendado por el fabricante y la presión de sostenimiento se determinó conforme lo antes descrito en éste capítulo, donde se observa que entre más se incrementa la temperatura se tiene que disminuir la presión de sostenimiento para que la pieza no salga con exceso de material y por el lado contrario entre menos temperatura necesitamos una mayor presión de sostenimiento para poder llenar la pieza.



Gráfica 4.3.- Ventana de proceso .

Tiempo de enfriamiento del punto de inyección.

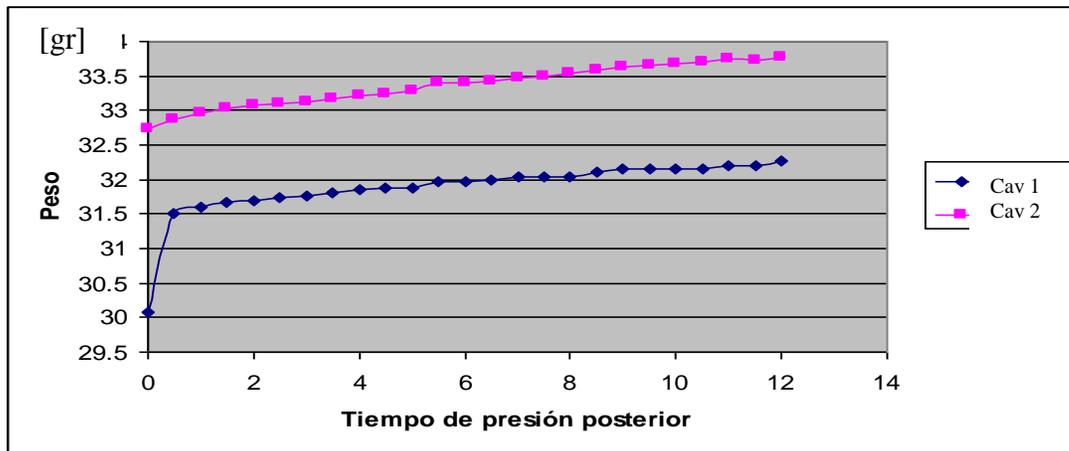
El tiempo de enfriamiento toma su importancia durante el ciclo de inyección, dado que determina las tolerancias en las dimensiones de la pieza así como su peso final; sin embargo, el tiempo de enfriamiento en la entrada permite determinar el peso final de la pieza durante un ciclo de inyección. Este tiempo de enfriamiento del punto de inyección se midió a partir de considerar el tiempo de presión posterior aplicado con incrementos de 0.5 seg hasta obtener un peso estable de las piezas.

Sello del punto de inyección.

| Tiempo [s] | Peso [gr] | |
|------------|-----------|--------|
| | Cav. 1 | Cav. 2 |
| 0 | 30.08 | 32.74 |
| 0.5 | 31.51 | 32.87 |
| 1 | 31.6 | 32.96 |
| 1.5 | 31.68 | 33.04 |
| 2 | 31.69 | 33.07 |
| 2.5 | 31.73 | 33.09 |
| 3 | 31.76 | 33.13 |
| 3.5 | 31.8 | 33.18 |
| 4 | 31.85 | 33.22 |
| 4.5 | 31.87 | 33.25 |
| 5 | 31.87 | 33.29 |
| 5.5 | 31.96 | 33.39 |
| 6 | 31.98 | 33.39 |
| 6.5 | 31.99 | 33.42 |
| 7 | 32.03 | 33.46 |
| 7.5 | 32.04 | 33.5 |
| 8 | 32.05 | 33.53 |
| 8.5 | 32.1 | 33.59 |
| 9 | 32.15 | 33.63 |
| 9.5 | 32.15 | 33.66 |
| 10 | 32.16 | 33.68 |
| 10.5 | 32.16 | 33.7 |
| 11 | 32.19 | 33.74 |
| 11.5 | 32.21 | 33.73 |
| 12 | 32.27 | 33.78 |

Tabla 4.9.- Pesos de las piezas respecto al tiempo de presión posterior.

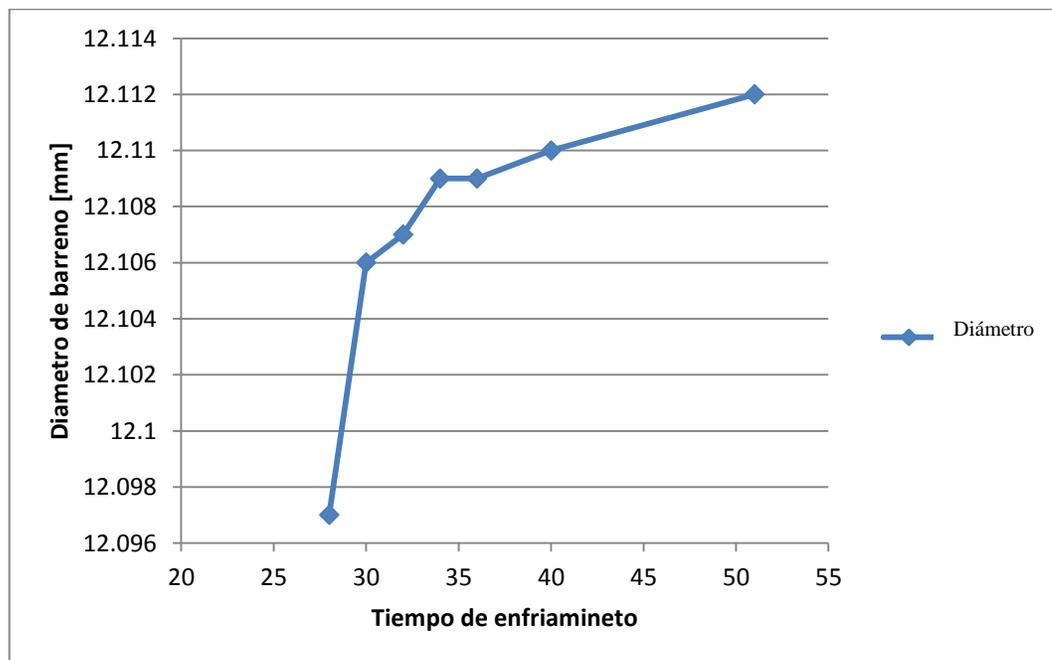
Partiendo de la tabla 4.9, se gráfcaron los puntos anteriores para tener una mejor visualización de la tendencia del peso con respecto al tiempo de presión posterior, gráfica 4.4.



Gráfica 4.4.- Curvas del tiempo de enfriamiento del punto de inyección.

En este experimento la presión posterior se obtuvo a partir del 70% de la presión pico, y se fue incrementado el tiempo cada medio segundo. Como puede verse, las curvas no definen con claridad el tiempo de sostenimiento, ya que va aumentando el peso de la pieza y no llega a estabilizarse; después de 10 [s] de tiempo de sostenimiento las piezas presentaban excedente de material.

Tiempo de enfriamiento.



Gráfica 4.5.- Tiempo de enfriamiento vs. Dimensión de una pieza

Como se puede observar, el tiempo de enfriamiento influye en las dimensiones finales de la pieza, entre más tiempo permanezca la pieza dentro del molde, menor será su contracción.

Como el moldeo científico se basa en la recolección de los datos del proceso cuando éste tiende a estabilizarse, y a la observación en la apariencia de las piezas inyectadas; en este trabajo se notó que las piezas mostraban defectos de excedente de material, líneas de soldadura, rechupes, manchas mate y deformación viscosa del bebedero, atribuidos a la velocidad de inyección, presión posterior, temperatura del molde y al punto de inyección; por ello, se recurrió a plantear un diseño de experimentos para la evaluación de los defectos presentados.

Diseño de experimentos (DoE).

Este procedimiento ha tenido su aplicación en todos aquellos estudios y situaciones en las que se necesita ensayar una hipótesis sobre una posible relación causa-efecto. DoE (por sus siglas en inglés DESIGN OF EXPERIMENTS) ha tenido un gran auge durante los últimos años en la industria del plástico dadas las variantes involucradas en el proceso.

El diseño de experimento comienza con un diagrama de flujo que muestra la evaluación de las partes a inyectar y su relación con los cambios de su entorno, como se muestra en la figura 4.26 en este diagrama se puede observar la relación que hay entre el moldeo científico y el DoE.

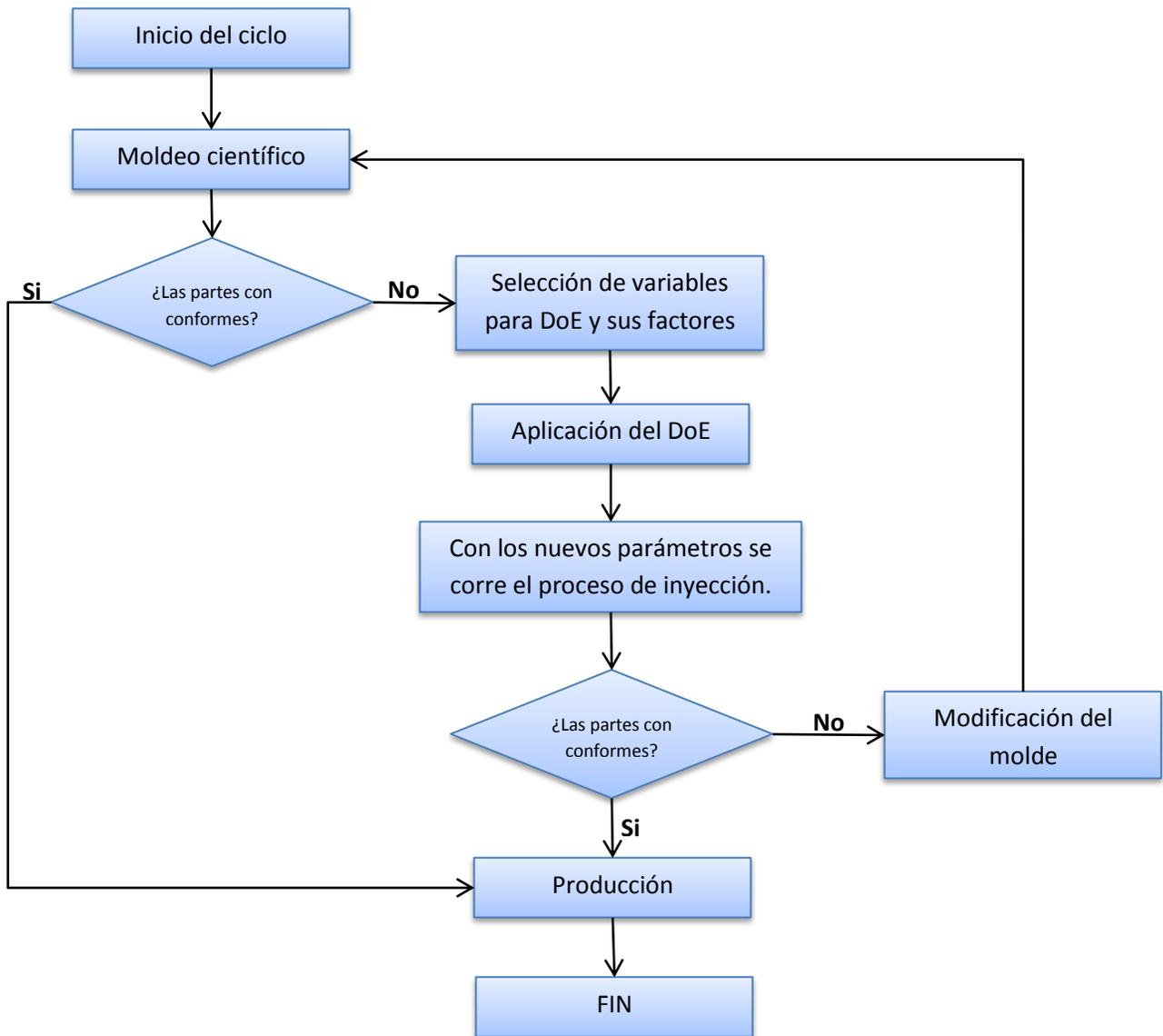
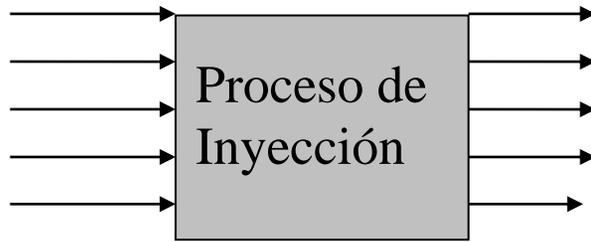


Figura. 4.27.- Diagrama de flujo.

Con mayor precisión, puede ser definido como el realizar un conjunto de pruebas en las cuales se llevan a cabo cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, para observar e identificar los motivos de los cambios en las variables de salida o respuesta del proceso [7]. En la figura 4.28, se muestran las variables a tomar en cuenta como parámetros anteriores al proceso, y lo que se espera obtener como paso posterior.

La aplicación del DoE en el proceso de conformado de plásticos se basa en definir de 3 a 5 variables importantes, que dependen de los objetivos a seguir, definiendo factores para las variables del proceso; es decir, los ciclos a producir, este proceso se llega a complementar con la experiencia y con la habilidad del operador.

- Temperatura del molde.
- Presión posterior.
- Velocidad de inyección.
- Temperatura de bebedero.



- Excedente del material.
- Línea de soldadura.
- Rechupes.
- Manchas mate.
- Deformación viscosa del bebedero.

Figura. 4.28.- Variables críticas y respuestas a partir de las variables.

En las figuras de la 4.29 a la 4.38 se muestran ejemplos de distintas piezas que detallan las 5 variables mostradas en la figura 4.19, los ejemplos tienen la finalidad de mostrar que estos defectos se pueden presentar en cualquier tipo de pieza.



Figura 4.29.- Manchas mate en el punto de inyección



Figura.4.30.-Manchas mate en la parte superior de una pieza



Figura.4.31.- Rebabas en el área de punto de inyección



Figura.4.32.- Manchas mate en el punto de inyección

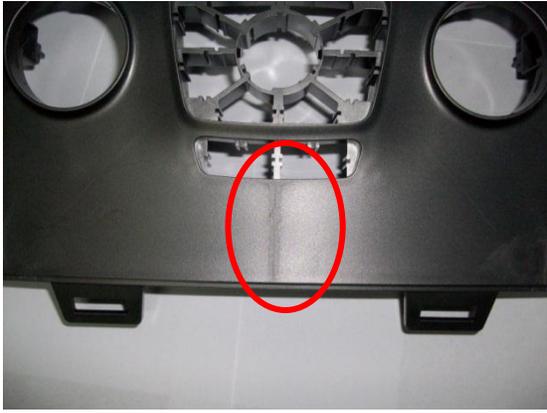


Figura.4.33.- Línea de unión o soldadura.



Figura. 4.34.- Línea de unión o soldadura con manchas mate.



Figura.4.35.- Mancha mate en la parte visual de la pieza



Figura.4.36.- Línea de unión o soldadura



Figura.4.37.- Mancha mate en el punto de inyección

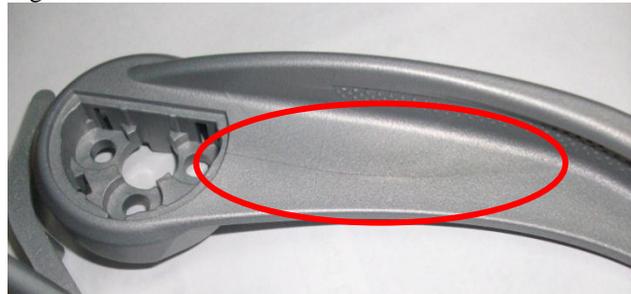


Figura. 4.38.- Línea de unión o soldadura

Los defectos considerados como elementos de salida del proceso de inyección de acuerdo a la figura 4.28, se pueden controlar, cambiando y ajustando los parámetros del proceso. Para el caso del excedente del material, la presión de sostenimiento y su tiempo, la temperatura de la masa, el punto de conmutación son los parámetros del proceso que manipulan a este defecto. Para el caso de las líneas de soldadura o líneas de unión, este defecto se debe principalmente a la posición donde se ubica el punto de inyección. Se puede corregir variando la velocidad de inyección o la temperatura del molde, para lograr una mayor velocidad del flujo; o se puede utilizar la contrapresión para forzar

al material a unirse en la región de soldadura, pero la principal causa es la posición del punto de inyección.

Los rechupes, son contracciones superficiales debidas a la falta de compactación del material, para eliminarlos se aumenta la presión de sostenimiento o se cambia el tiempo de sostenimiento y/o el punto de conmutación.

Las manchas mate son comunes para este tipo de material, las que se pueden corregir disminuyendo la velocidad de inyección, aumentando la temperatura del molde, pero tomando en cuenta que se vuelvan a presentar los defectos de rechupe y rebaba. Si aún persisten las manchas mate, se debe corregir la geometría del punto de inyección, aunque esto a veces, implica una reparación mayor del molde.

La deformación viscosa del bebedero se genera por el manejo de temperaturas altas en el punto de inyección o en la colada caliente, ésta debe disminuirse procurando que el flujo del material tenga la consistencia adecuada de inyección.

Una vez identificados los defectos y sus posibles causas, se plantea un control de datos experimentales conforme a la tabla 4.10, en donde se proponen tres condiciones de evaluación en este trabajo; es decir, los valores obtenidos se ubicarán en los límites mínimo, medio y alto. Los límites se fijan en base a la ficha técnica del proveedor de la materia prima, a la experiencia en el campo de la inyección de los plásticos y a los resultados obtenidos en la alternativa empírica; tomando en cuenta también las limitantes de los equipos con los que se cuenta para hacer la experimentación.

| A [°C] | B [Bar] | C [mm/s] | D [mm²] |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Temperatura del molde | Presión posterior | Velocidad de inyección | Área del punto de inyección |
| 60 | 400 | 10 | 7.5 |
| 80 | 600 | 5 | 16.5 |
| 100 | 800 | 1 | |

Tabla 4.10.- Parámetros a considerar.

Los valores de la tabla 4.10 se toman para formar un diseño factorial, considerando que los factores son las variables a modificar, A, B, C, D, en relación a los llamados niveles, indicadores de la intensidad de una variables independiente cuantitativas, definidos en las filas mostradas en dicha tabla. Un experimento factorial consta de dos o más factores, cada uno de los cuales con distintos valores o "niveles", (3 niveles, alto, medio y bajo en el caso de las tres primeras columnas de la tabla 4.10 y 2 niveles en el caso del área del punto de inyección por tener dos cavidades), cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles en todos los factores. Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre la dicha variable.

Para el caso en estudio y reiterando lo anterior se tiene:

| Factor | Nivel |
|---------------------------------|-------|
| Temperatura del molde (T) | 3 |
| Presión posterior (P) | 3 |
| Velocidad de inyección (V) | 3 |
| Área del punto de inyección (A) | 2 |
| Tratamientos (3*3*3*2) | 54 |

El experimento factorial se define como la combinación de las variables Rn, Yn, según Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2005: John Wiley & Sons, Inc. , para las combinaciones involucradas:

| | R1 | R2 | R3 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| T ₁ :A ₁ T ₁ P ₁ V ₁ | Y ₁₁₁₁ | Y ₁₁₁₁ | Y ₁₁₁₁ |
| T ₂ :A ₁ T ₁ P ₁ V ₂ | Y ₁₁₁₂ | Y ₁₁₁₂ | Y ₁₁₁₂ |
| T ₃ :A ₁ T ₁ P ₁ V ₃ | Y ₁₁₁₃ | Y ₁₁₁₃ | Y ₁₁₁₃ |
| T ₄ :A ₁ T ₁ P ₂ V ₁ | Y ₁₁₂₁ | Y ₁₁₂₁ | Y ₁₁₂₁ |
| T ₅ :A ₁ T ₁ P ₂ V ₂ | Y ₁₁₂₂ | Y ₁₁₂₂ | Y ₁₁₂₂ |
| T ₆ :A ₁ T ₁ P ₂ V ₃ | Y ₁₁₂₃ | Y ₁₁₂₃ | Y ₁₁₂₃ |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| T ₅₄ :A ₂ T ₃ P ₃ V ₃ | Y ₂₃₃₃ | Y ₂₃₃₃ | Y ₂₃₃₃ |

Tabla 4.11.- Diseño factorial para las variables involucradas.(Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2005: John Wiley & Sons, Inc.)

Sustituyendo los valores involucrados en el caso de estudio, de acuerdo a lo planteado en la tabla anterior con 54 tratamientos o combinaciones, se tiene lo mostrado en la tabla 4.12; donde se muestran tres columnas principales, el número de eventos, los factores considerados en la tabla 4.1 y los resultados obtenidos en cada evento en base a la combinación de factores establecida. De los resultados obtenidos se observaron los cambios en la posición y tamaño de los rechupes, manchas mate y áreas en las líneas de unión, medidos en mm, como parámetros importantes a controlar en referencia a la apariencia de la pieza.

| Eventos. | FACTORES | | | | RESULTADOS | | |
|----------|---|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------|--|
| | (A) Área del punto de inyección [mm ²] | (B) Temperatura del molde [°C] | (C) Presión posterior [Bar] | (D) Velocidad de inyección [mm/s] | Magnitud de Mancha [mm] | Rechupe [mm] | Área de las líneas de unión [mm ²] |
| 1 | 7.5 | 60 | 400 | 10 | 34.2 | 5.3 | 69.1 |
| 2 | 7.5 | 60 | 400 | 5 | 28.1 | 5.4 | 72.8 |
| 3 | 7.5 | 60 | 400 | 1 | 26.3 | 6.7 | 82.6 |
| 4 | 7.5 | 60 | 600 | 10 | 35.3 | 4.9 | 67.1 |
| 5 | 7.5 | 60 | 600 | 5 | 24.3 | 5.0 | 72.5 |
| 6 | 7.5 | 60 | 600 | 1 | 24.1 | 4.9 | 78.5 |
| 7 | 7.5 | 60 | 800 | 10 | 30.8 | 5.2 | 75.9 |
| 8 | 7.5 | 60 | 800 | 5 | 24.7 | 5.3 | 71.9 |
| 9 | 7.5 | 60 | 800 | 1 | 18.5 | 5.6 | 84.4 |
| 10 | 7.5 | 80 | 400 | 10 | 32.5 | 6.1 | 80.9 |
| 11 | 7.5 | 80 | 400 | 5 | 19.8 | 5.9 | 74.5 |
| 12 | 7.5 | 80 | 400 | 1 | 19.4 | 6.1 | 75.7 |
| 13 | 7.5 | 80 | 600 | 10 | 23.2 | 6.3 | 90.0 |
| 14 | 7.5 | 80 | 600 | 5 | 20.0 | 5.5 | 83.2 |
| 15 | 7.5 | 80 | 600 | 1 | 18.0 | 5.9 | 81.2 |
| 16 | 7.5 | 80 | 800 | 10 | 33.7 | 5.1 | 82.0 |
| 17 | 7.5 | 80 | 800 | 5 | 21.5 | 5.2 | 78.8 |
| 18 | 7.5 | 80 | 800 | 1 | 19.3 | 5.5 | 83.3 |
| 19 | 7.5 | 100 | 400 | 10 | 22.5 | 3.9 | 78.6 |
| 20 | 7.5 | 100 | 400 | 5 | 20.4 | 4.6 | 69.8 |
| 21 | 7.5 | 100 | 400 | 1 | 16.8 | 4.5 | 73.8 |
| 22 | 7.5 | 100 | 600 | 10 | 21.8 | 3.8 | 71.2 |
| 23 | 7.5 | 100 | 600 | 5 | 13.4 | 4.3 | 72.7 |
| 24 | 7.5 | 100 | 600 | 1 | 14.7 | 5.1 | 76.3 |
| 25 | 7.5 | 100 | 800 | 10 | 21.2 | 3.1 | 62.9 |
| 26 | 7.5 | 100 | 800 | 5 | 17.6 | 3.7 | 61.5 |
| 27 | 7.5 | 100 | 800 | 1 | 13.1 | 4.3 | 75.5 |
| 28 | 16.5 | 60 | 400 | 10 | 19.8 | 4.7 | 82.5 |
| 29 | 16.5 | 60 | 400 | 5 | 15.1 | 4.7 | 90.4 |
| 30 | 16.5 | 60 | 400 | 1 | 12.1 | 5.6 | 94.2 |
| 31 | 16.5 | 60 | 600 | 10 | 18.4 | 5.0 | 83.4 |

| 32 | 16.5 | 60 | 600 | 5 | 16.2 | 5.2 | 83.9 |
|----------|---|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------|--|
| Eventos. | FACTORES | | | | RESULTADOS | | |
| | (A) Área del punto de inyección [mm ²] | (B) Temperatura del molde [°C] | (C) Presión posterior [Bar] | (D) Velocidad de inyección [mm/s] | Magnitud de Mancha [mm] | Rechupe [mm] | Área de las líneas de unión [mm ²] |
| 33 | 16.5 | 60 | 600 | 1 | 10.3 | 4.9 | 97.4 |
| 34 | 16.5 | 60 | 800 | 10 | 16.9 | 5.1 | 83.1 |
| 35 | 16.5 | 60 | 800 | 5 | 14.2 | 4.9 | 91.5 |
| 36 | 16.5 | 60 | 800 | 1 | 10.2 | 4.9 | 97.3 |
| 37 | 16.5 | 80 | 400 | 10 | 19.2 | 6.3 | 80.8 |
| 38 | 16.5 | 80 | 400 | 5 | 15.0 | 6.0 | 84.4 |
| 39 | 16.5 | 80 | 400 | 1 | 7.3 | 6.1 | 86.8 |
| 40 | 16.5 | 80 | 600 | 10 | 18.5 | 5.9 | 86.9 |
| 41 | 16.5 | 80 | 600 | 5 | 13.4 | 5.2 | 86.4 |
| 42 | 16.5 | 80 | 600 | 1 | 0.0 | 5.4 | 96.4 |
| 43 | 16.5 | 80 | 800 | 10 | 25.1 | 5.5 | 80.3 |
| 44 | 16.5 | 80 | 800 | 5 | 4.2 | 4.5 | 89.5 |
| 45 | 16.5 | 80 | 800 | 1 | 0.0 | 5.3 | 99.0 |
| 46 | 16.5 | 100 | 400 | 10 | 17.5 | 4.0 | 76.6 |
| 47 | 16.5 | 100 | 400 | 5 | 9.6 | 4.3 | 83.5 |
| 48 | 16.5 | 100 | 400 | 1 | 0.0 | 4.6 | 87.5 |
| 49 | 16.5 | 100 | 600 | 10 | 14.9 | 3.9 | 77.0 |
| 50 | 16.5 | 100 | 600 | 5 | 11.9 | 4.0 | 80.4 |
| 51 | 16.5 | 100 | 600 | 1 | 0.0 | 4.9 | 86.7 |
| 52 | 16.5 | 100 | 800 | 10 | 13.7 | 3.2 | 58.5 |
| 53 | 16.5 | 100 | 800 | 5 | 11.2 | 4.0 | 72.5 |
| 54 | 16.5 | 100 | 800 | 1 | 0.0 | 4.1 | 83.3 |

Tabla 4.12.- Relación de factores y resultados, medidos en los 54 eventos. Valores promedio.

En la magnitud de la mancha mate (Blush) que aparece desde el punto de inyección hasta la parte superior de la pieza, la parte a medir fue únicamente la parte superior, toda vez que en el área del punto de inyección nunca se podrá corregir este defecto por la geometría del punto de inyección. Esto se podrá apreciar mejor en la figura 4.39, donde se muestra cómo se midió el tamaño de la mancha mate y en que parte se tomó la medida.

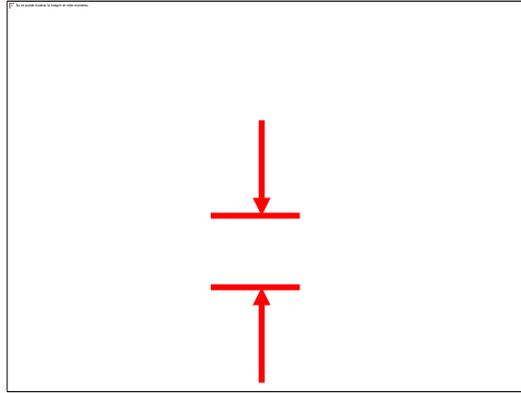


Figura. 4.39.- Forma de medir las manchas mate (Blush).

En cuanto al rechupe, segunda columna, se midió su espesor en la parte media de la pieza, dado que en esa parte de la pieza existe una mayor masa, provocando que el material se contraiga y se presente el llamado rechupe. En la figura 4.40 Se muestra la forma de medir tal defecto.

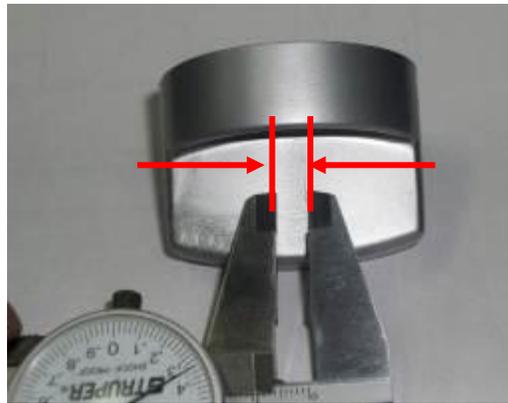


Figura 4.40.- Forma de medir la zona del rechupe.

En cuanto a las líneas de unión, se tomó medición del área donde el flujo se une para generar este defecto. Como se muestra en la figura 4.41, se generó un área de unión y no una línea propiamente dicha. El defecto fue cambiando conforme se mueven los valores de los parámetros del proceso, el defecto se produjo por el tipo de color en el material, el cual tiene pequeñas partículas de aluminio (dato proporcionado por el fabricante), lo que provoca que no se una el material con una buena calidad en esa parte de la pieza. Una vez obtenidos los datos antes descritos, se procedió a realizar el análisis de varianza, ANOVA, (Analysis of Variance por sus siglas en inglés).

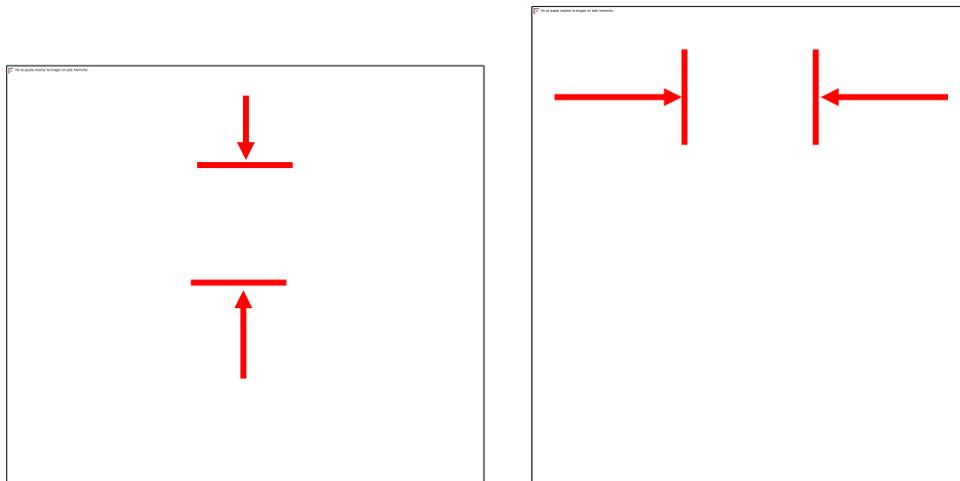


Figura 4.41.- Medición del defecto llamado línea de unión.

Análisis de Varianza

La metodología para el análisis de experimentos que involucra varias variables independientes que no pueden ser o no han sido controladas, pueden expresarse con ecuaciones relativamente simples en términos de las mediciones de la respuesta; es decir, el análisis de varianza determina cuales son las variables independientes de importancia en un estudio, y en que forma interactúan y afectan a la respuesta. Aunado a esto, el análisis de varianza analiza la variabilidad de la respuesta y asigna componentes de esa variabilidad a cada uno de los conjuntos de las variables independientes. La idea detrás de dicho procedimiento es que las variables de respuesta varían debido a la variación de un conjunto de variables independientes desconocidas [7].

La tabla 4.13 muestra las ecuaciones que intervienen en la colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, donde la varianza está particionada en los componentes involucrados y sus diferentes variables.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Media de cuadrados | Valor esperado de las medias | Prueba |
|----------------------|--------------------|-------------------|---|---|-------------------------|
| Factor A | a-1 | SCF_A | $MCF_A = \frac{SCF_A}{a-1}$ | $\alpha^2 + \frac{nbcd \sum_{i=1}^a \alpha_i^2}{a-1}$ | $\frac{MCF_A}{MEC}$ |
| Factor B | b-1 | SCF_B | $MCF_B = \frac{SCF_B}{b-1}$ | $\beta^2 + \frac{nacd \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$ | $\frac{MCF_B}{MEC}$ |
| Factor C | c-1 | SCF_C | $MCF_C = \frac{SCF_C}{c-1}$ | $\gamma^2 + \frac{nabd \sum_{k=1}^c \gamma_k^2}{c-1}$ | $\frac{MCF_C}{MEC}$ |
| Factor D | d-1 | SCF_D | $MCF_D = \frac{SCF_D}{d-1}$ | $\delta^2 + \frac{nabc \sum_{l=1}^d \delta_l^2}{d-1}$ | $\frac{MCF_D}{MEC}$ |
| Interacción AB | (a-1)(b-1) | SCI_{AB} | $MCI_{AB} = \frac{SCI_{AB}}{(a-1)(b-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{ncd \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$ | $\frac{MCI_{AB}}{MEC}$ |
| Interacción AC | (a-1)(c-1) | SCI_{AC} | $MCI_{AC} = \frac{SCI_{AC}}{(a-1)(c-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nbd \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c (\alpha\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$ | $\frac{MCI_{AC}}{MEC}$ |
| Interacción AD | (a-1)(d-1) | SCI_{AD} | $MCI_{AD} = \frac{SCI_{AD}}{(a-1)(d-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nbc \sum_{i=1}^a \sum_{l=1}^d (\alpha\delta)_{il}^2}{(a-1)(d-1)}$ | $\frac{MCI_{AD}}{MEC}$ |
| Interacción BC | (b-1)(c-1) | SCI_{BC} | $MCI_{BC} = \frac{SCI_{BC}}{(b-1)(c-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nad \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$ | $\frac{MCI_{BC}}{MEC}$ |
| Interacción BD | (b-1)(d-1) | SCI_{BD} | $MCI_{BD} = \frac{SCI_{BD}}{(b-1)(d-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nac \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d (\beta\delta)_{jl}^2}{(b-1)(d-1)}$ | $\frac{MCI_{BD}}{MEC}$ |
| Interacción CD | (c-1)(d-1) | SCI_{CD} | $MCI_{CD} = \frac{SCI_{CD}}{(c-1)(d-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nab \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d (\gamma\delta)_{kl}^2}{(c-1)(d-1)}$ | $\frac{MCI_{CD}}{MEC}$ |
| Interacción ABC | (a-1)(b-1)(c-1) | SCI_{ABC} | $MCI_{ABC} = \frac{SCI_{ABC}}{(a-1)(b-1)(c-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nd \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c (\alpha\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$ | $\frac{MCI_{ABC}}{MEC}$ |
| Interacción ABD | (a-1)(b-1)(d-1) | SCI_{ABD} | $MCI_{ABD} = \frac{SCI_{ABD}}{(a-1)(b-1)(d-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nc \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d (\alpha\beta\delta)_{ijl}^2}{(a-1)(b-1)(d-1)}$ | $\frac{MCI_{ABD}}{MEC}$ |
| Interacción ACD | (a-1)(c-1)(d-1) | SCI_{ACD} | $MCI_{ACD} = \frac{SCI_{ACD}}{(a-1)(c-1)(d-1)}$ | $\sigma^2 + \frac{nb \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d (\alpha\gamma\delta)_{ikl}^2}{(a-1)(c-1)(d-1)}$ | $\frac{MCI_{ACD}}{MEC}$ |

Tabla 4.13.- Experimentación factorial de cuatros factores (análisis multifactorial).

Donde:

SCF es la suma de los cuadrados de los factores principales.

SCI es la suma de los cuadrados de las interacciones.

SEC es la suma de errores cuadráticos.

MCF es la media de los cuadrados de los factores principales.

MEC es la media de los errores cuadráticos.

MCI es la media de los cuadrados de las interacciones.

MCF es la media de los cuadrados de los factores principales.

SC(Rep) es la suma de los cuadrados de las repeticiones.

MC(Rep) es la media de los cuadrados de las repeticiones.

Cada observación de la variable dependiente se compone conceptualmente, de tres partes independientes entre sí y debidas, cada una de ellas, a una fuente diferente de variación:

a) La línea base de comportamiento

Representa una cantidad mínima de la característica que medimos y que todos los sujetos comparten a nivel general, por el mero hecho de ser sujetos parecidos.

b) La parte que mide el efecto del tratamiento (influencia de la variable independiente sobre el valor tomado por la variable dependiente). Esta parte es igual para todos los sujetos que comparten un mismo tratamiento, y diferente entre los sujetos a los que se asignan distintos niveles de tratamiento.

c) La parte debida al error de medida (ruido).

Esta representa la "porción" del valor medido en la variable dependiente que no es debida a un nivel básico de comportamiento, ni a un tratamiento particular, sino a diferencias individuales que no han sido controladas durante el Experimento.

El objetivo del Análisis de Varianza es entonces comparar las diferencias (al cuadrado), debidas a los tratamientos (MCI) con las diferencias (al cuadrado) debidas a los errores (MCE). Se utilizan valores elevados al cuadrado para evitar que, hallando la media de medias, los valores negativos y los positivos se contrarresten y el resultado sea cero.[7]

Paso 1: Calcular $\sum (\sum Y)^2$ y $\sum Y^2$

" \sum " es el signo de sumatorio y significa simplemente sumar, todos los valores de la variables a la que antecede. "Y" es el símbolo que representa cada uno de los valores medidos.

Para cada tratamiento se calculará:

- La suma de todas las observaciones hechas bajo el tratamiento en cuestión, $\sum Y$.
- El cuadrado de esta suma, $(\sum Y)^2$, multiplicando el valor $\sum Y$ por sí mismo.
- La suma de los valores de todas las observaciones hechas bajo el tratamiento en cuestión, cada una elevada al cuadrado, $\sum Y^2$.

Paso 2: Calcular T, T² y la suma de todas las observaciones al cuadrado, S.

- T, el gran total, es la suma de todas las observaciones hechas a lo largo del Experimento, independientemente del nivel de tratamiento. Su valor se obtiene sumando los valores $\sum Y$ de todos los tratamientos.

- T², el cuadrado del gran total, se obtiene simplemente multiplicando el valor de T por sí mismo.

- S, la suma de todas las observaciones, cada una elevada al cuadrado, se obtiene sumando los valores $\sum Y^2$ de todos los tratamientos.

Paso 3: Calcular las sumas de cuadrados, SCI, SCT y SCE

Las sumas de los cuadrados se obtienen de la siguiente forma:

a) Calcular los valores intermedios A y B.

-A se obtiene dividiendo, para cada tratamiento, el valor $(\sum Y)^2$ por el número n de observaciones hechas a este nivel de tratamiento y sumando los resultados así obtenidos.

$$A = \sum [(\sum Y)^2 / n]$$

- B se obtiene dividiendo T² por el número total N de observaciones hechas en el Experimento.

$$B = T^2 / N$$

b) Calcular la suma de los cuadrados.

- SCI es la suma de los cuadrados relativa al efecto de los tratamientos y se obtiene restando B de A.

$$SCI = A - B$$

- SCT es la suma de los cuadrados total y se obtiene restando B de S.

$$SCT = S - B$$

- SCE es la suma de los cuadrados relativa al efecto de los errores y corresponde a la diferencia entre la suma de los cuadrados total y la relativa al efecto de los tratamientos.

$$SCE = SCT - SCI$$

Paso 4: Calcular las medias cuadráticas MCI y MCE

MCI es la media cuadrática de las diferencias entre las observaciones debidas a los tratamientos y se obtiene aplicando la fórmula:

$$MCI = SCI / (t - 1) \quad (t = \text{número de tratamientos del Experimento})$$

MCE es la media cuadrática de las diferencias entre las observaciones debidas a los errores y se obtiene aplicando la fórmula:

$$MCE = SCE / (N - t). \quad (N = \text{número total de observaciones hechas en el Experimento y } t = \text{número de tratamientos}).$$

Paso 5: Calcular el Valor de Contraste, Fc

El Valor de Contraste representa la relación entre la variación media (cuadrática) de las diferencias entre las observaciones debida a los tratamientos, y la variación media (cuadrática) debida a los errores (=ruido).

Es el resultado numérico del ANDEVA y en él se resume la información que nos proporciona el Experimento: El grado en que la variable independiente (supuesta causa) influye sobre los valores de la variable dependiente (efecto en estudio).

Se calcula dividiendo MCI por MCE.

$$F_c = MCI/MCE$$

INTERPRETACIÓN

Pauta general de interpretación

La información a extraer de un Experimento y del respectivo Análisis de Varianza se concentra en la interpretación del valor de contraste Fc.

a) $F_c < 1$. Si Fc es menor que uno, significa que los factores extraños influyen sobre el valor de la variable dependiente de manera más determinante que los tratamientos.

Esto quiere decir que la relevancia de nuestra variable no es muy elevada y posiblemente no hemos identificado la causa principal. (Cuanto menor Fc, menor será también la relevancia de la variable independiente).

b) $F_c > 1$. Si Fc es mayor que uno, los tratamientos proporcionados son efectivamente el factor que mayor influencia tiene sobre la variable dependiente. Esto significa que se ha identificado la causa más determinante para la variación de la característica medida (Cuanto mayor Fc, mayor será también la relevancia de la variable independiente).[7]

A partir de lo anterior se aplica para el caso de estudio quedando de la siguiente forma:

MANCHAS MATE

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Media de cuadrados | Prueba F ₀ |
|--|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| Repeticiones | 1 | 0.2045 | 0.2045 | 4.4583 |
| Efectos Principales | | | | |
| A:Área del punto de inyección | 1 | 3338.8912 | 3338.8912 | 370.9564 |
| B: Temperatura del molde | 2 | 1231.0135 | 615.5068 | 68.3838 |
| C:Presión posterior. | 2 | 134.7302 | 67.3651 | 7.4844 |
| D: Velocidad de inyección. | 2 | 2339.4635 | 1169.7318 | 129.9592 |
| Interacciones con dos factores | | | | |
| Interacción AB | 2 | 86.9702 | 43.4851 | 4.8313 |
| Interacción AC | 2 | 24.2269 | 12.1134 | 1.3458 |
| Interacción AD | 2 | 158.5035 | 79.2518 | 8.8050 |
| Interacción BC | 4 | 49.0909 | 12.2727 | 1.3635 |
| Interacción BD | 4 | 179.5943 | 44.8986 | 4.9883 |
| Interacción CD | 4 | 37.7476 | 9.4369 | 1.0485 |
| Interacciones con tres factores | | | | |

| | | | | |
|-----------------------------------|------------|----------|---------|--------|
| ABC | 4 | 95.1543 | 23.7886 | 2.6429 |
| ABD | 4 | 85.7309 | 21.4327 | 2.3812 |
| ACD | 4 | 170.0311 | 42.5078 | 4.7227 |
| BCD | 8 | 161.8180 | 20.2272 | 2.2473 |
| Interacciones con cuatro factores | | | | |
| ABCD | 8 | 8.7944 | 1.0993 | 0.1221 |
| Error | 53 | 477.0405 | 9.0008 | |
| TOTAL | 107 | | | |

Tabla 4.14.-Reporte estadístico bajo el enfoque de Diseño Factorial Completo del experimento con la respuesta de la longitud de la mancha mate.

Los valores siguientes se obtuvieron a partir de los grados de libertad obtenidos, con un nivel de significancia del 10%; es decir, se considera que de 100 piezas inyectadas se espera que 10 piezas se encuentren fuera de los resultados esperados.

Los valores utilizados del nivel de significancia fueron obtenidos de la siguiente tabla.[7]

Tabla 4.15.- Valores con un nivel de significancia del 10%. [7]

| Se rechaza sí $F_0 > F_{\alpha : v1 v1}$ | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Efectos principales | | | | | | | | | | | |
| Factor A | | Factor B | | Factor C | | Factor D | | | | | |
| v1= | 1 | v1= | 2 | v1= | 2 | v1= | 2 | | | | |
| v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | | | | |
| $F_{0.10:1,53} =$ | 2.82 | $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | | | | |
| Efectos combinados por pares | | | | | | | | | | | |
| Interacción AB | | Interacción AC | | Interacción AD | | Interacción BC | | Interacción BD | | Interacción CD | |
| v1= | 2 | v1= | 2 | v1= | 2 | v1= | 4 | v1= | 4 | v1= | 4 |
| v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 |
| $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | $F_{0.10:2,53} =$ | 2.42 | $F_{0.10:4,53} =$ | 2.06 | $F_{0.10:4,53} =$ | 2.06 | $F_{0.10:4,53} =$ | 2.06 |
| Efectos combinados por tercias | | | | | | | | | | | |
| ABC | | | ABD | | | ACD | | | BCD | | |
| v1= | 4 | v1= | 4 | v1= | 4 | v1= | 8 | | | | |
| v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | v2= | 53 | | | | |
| $F_{0.10:4,53} =$ | 2.07 | $F_{0.01:4,53} =$ | 2.07 | $F_{0.10:4,53} =$ | 2.07 | $F_{0.10:8,53} =$ | 1.8 | | | | |
| Efectos combinados de los cuatro factores | | | | | | | | | | | |
| ABCD | | | | | | | | | | | |
| v1= | 8 | | | | | | | | | | |
| v2= | 53 | | | | | | | | | | |
| $F_{0.10:8,53} =$ | 1.8 | | | | | | | | | | |

Nota: estos valores se utilizan para las demás respuestas, dado que son los mismos grados de libertad y por tanto el mismo nivel de significancia.

Análisis de los resultados del reporte estadístico:

-Respuesta de la longitud de la mancha.

Para todos los factores principales se rechaza la hipótesis nula, dado que:

$$F_{0A} > F_{0.1:1,53}$$

$$F_{0B} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0C} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0D} > F_{0.1:2,53}$$

Entonces SÍ existe una diferencia significativa.

Para las combinaciones AB, AD y BD tenemos:

$$F_{0AB} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0AD} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0BD} > F_{0.1:4,53}$$

Entonces SÍ existe una diferencia significativa.

Para las combinaciones AC, BC y CD tenemos:

$$F_{0AC} < F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0BC} < F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0CD} < F_{0.1:4,53}$$

Se acepta la hipótesis nula y por lo tanto existe una interacción, es decir, No existe una diferencia significativa.

De los resultados anteriores se puede determinar que la variable de la presión posterior no influye directamente en la mancha mate, aunque en los análisis de los factores principales se nota que si existe diferencia significativa, al momento de interactuar con otro factor se acepta la hipótesis nula y por ende no existe una diferencia significativa.

Para las triples combinaciones se rechaza la hipótesis nula, dado que:

$$F_{0ABC} > F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0ABD} > F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0ACD} > F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0BCD} > F_{0.1:8,53}$$

Por lo tanto SI existe una diferencia significativa.

Para la interacción de los cuatros factores tenemos que:

$$F_{0ABCD} < F_{0.1:8,53}$$

Entonces NO existe una diferencia significativa.

RECHUPE

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Media de cuadrados | Prueba F ₀ |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| Repeticiones | 1 | 0.1408 | 0.1408 | 0.0542 |
| Efectos Principales | | | | |
| A:Área del punto de inyección | 1 | 0.8712 | 0.8712 | 7.9690 |
| B: Temperatura del molde | 2 | 44.1739 | 22.0869 | 202.0322 |
| C:Presión posterior. | 2 | 6.0772 | 3.0386 | 27.7946 |
| D: Velocidad de inyección. | 2 | 3.5317 | 1.7658 | 16.1523 |
| Interacciones con dos factores | | | | |
| Interacción AB | 2 | 0.5680 | 0.2840 | 2.5976 |
| Interacción AC | 2 | 0.0524 | 0.0262 | 0.2397 |
| Interacción AD | 2 | 0.4757 | 0.2379 | 2.1758 |
| Interacción BC | 4 | 2.8356 | 0.7089 | 6.4843 |
| Interacción BD | 4 | 4.1961 | 1.0490 | 9.5956 |
| Interacción CD | 4 | 0.3678 | 0.0919 | 0.8410 |
| Interacciones con tres factores | | | | |
| ABC | 4 | 1.4459 | 0.3615 | 3.3065 |
| ABD | 4 | 0.1543 | 0.0386 | 0.3528 |
| ACD | 4 | 6.2154 | 1.5538 | 14.2132 |
| BCD | 8 | 3.2244 | 0.4031 | 3.6868 |
| Interacciones con cuatro factores | | | | |
| ABCD | 8 | 0.6419 | 0.0802 | 0.7339 |
| Error | 53 | 5.7942 | 0.1093 | |
| TOTAL | 107 | | | |

Tabla 4.16.-Reporte estadístico bajo el enfoque de Diseño Factorial Completo del experimento con la respuesta del rechupe.

Análisis de los resultados del reporte estadístico:

-Respuesta del rechupe.

Para todos los factores principales se rechaza la hipótesis nula, dado que:

$$F_{0A} > F_{0.1;1,53}$$

$$F_{0B} > F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0C} > F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0D} > F_{0.1;2,53}$$

Entonces SÍ existe una diferencia significativa.

Para las combinaciones AC, AD y CD, tenemos:

$$F_{0 AC} < F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0 AD} < F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0 CD} < F_{0.1;4,53}$$

Se acepta la hipótesis nula y por lo tanto NO existe una diferencia significativa.

Para las combinaciones AB, BC y BD tenemos:

$$F_{0 AB} > F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0 BC} > F_{0.1;2,53}$$

$$F_{0 CD} > F_{0.1;4,53}$$

SÍ existe una diferencia significativa.

Para las triples combinaciones se tienen que:

$$F_{0 ABC} > F_{0.1;4,53}$$

$$F_{0 ACD} > F_{0.1;4,53}$$

$$F_{0 BCD} > F_{0.1;8,53}$$

Por lo tanto SI existe una diferencia significativa. Además se observa que la presión posterior es el factor que influye en la respuesta de rechufe.

$$F_{0 ABD} < F_{0.1;4,53}$$

Se acepta la hipótesis nula y por lo tanto no hay una diferencia significativa para esta combinación.

Para la interacción de los cuatros factores tenemos que:

$$F_{0 ABCD} < F_{0.1;8,53}$$

NO existe una diferencia significativa.

LINEAS DE UNIÓN.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Media de cuadrados | Prueba F ₀ |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| Repeticiones | 1 | 58.8747 | 58.8747 | 20.8109 |
| Efectos Principales | | | | |
| A: Área del punto de inyección | 1 | 2381.5858 | 2381.5858 | 56.6848 |
| B: Temperatura del molde | 2 | 1789.0713 | 894.5356 | 21.2911 |
| C: Presión posterior. | 2 | 92.5262 | 46.2631 | 1.1011 |
| D: Velocidad de inyección. | 2 | 1432.7721 | 716.3860 | 17.0509 |
| Interacciones con dos factores | | | | |
| Interacción AB | 2 | 330.1150 | 165.0575 | 3.9286 |
| Interacción AC | 2 | 5.7495 | 2.8748 | 0.0684 |
| Interacción AD | 2 | 477.9883 | 238.9941 | 5.6884 |
| Interacción BC | 4 | 910.4003 | 227.6001 | 5.4172 |
| Interacción BD | 4 | 233.7362 | 58.4341 | 1.3908 |
| Interacción CD | 4 | 228.0432 | 57.0108 | 1.3569 |
| Interacciones con tres factores | | | | |
| ABC | 4 | 40.4839 | 10.1210 | 0.2409 |
| ABD | 4 | 155.0885 | 38.7721 | 0.9228 |
| ACD | 4 | 236.1045 | 59.0261 | 1.4049 |
| BCD | 8 | 187.6475 | 23.4559 | 0.5583 |
| Interacciones con cuatro factores | | | | |
| ABCD | 8 | 65.1395 | 8.1424 | 0.1938 |
| Error | 53 | 2226.7706 | 42.0145 | |
| TOTAL | 107 | | | |

Tabla 4.17.-Reporte estadístico bajo el enfoque de Diseño Factorial Completo del experimento con la respuesta del área de las líneas de unión.

Análisis de los resultados del reporte estadístico:

-Respuesta del rechupe.

Para los factores principales se tiene que:

$$F_{0A} > F_{0.1:1,53}$$

$$F_{0B} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0C} < F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0D} > F_{0.1:2,53}$$

Para el factor C se acepta la hipótesis nula, por lo tanto NO existe diferencia significativa y para los demás factores se rechaza y por lo tanto SI existe diferencia significativa.

Para las combinaciones AC, AD y CD, tenemos:

$$F_{0 AC} < F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0 BD} < F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0 CD} < F_{0.1:4,53}$$

Se acepta la hipótesis nula y por lo tanto NO existe una diferencia significativa.

Para las combinaciones AB, BC y BD tenemos:

$$F_{0 AB} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0 AD} > F_{0.1:2,53}$$

$$F_{0 BC} > F_{0.1:4,53}$$

SÍ existe una diferencia significativa.

En estas interacciones se observa que los factores área de inyección y la temperatura del molde afectan a la respuesta de la línea de unión.

Para las triples combinaciones se tienen que:

$$F_{0 ABC} < F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0 ACD} < F_{0.1:4,53}$$

$$F_{0 BCD} < F_{0.1:8,53}$$

$$F_{0 ABD} < F_{0.1:4,53}$$

Se acepta la hipótesis nula y por lo tanto no hay una diferencia significativa para todas las combinaciones de tres factores.

Para la interacción de los cuatros factores tenemos que:

$$F_{0 ABCD} < F_{0.1:8,53}$$

NO existe una diferencia significativa.

Se nota que para la mancha mate, los factores que influyen directamente son: área del punto de inyección, temperatura del molde y la velocidad de inyección. En el caso de la contracción del material se nota que la presión posterior es la que más influye para este defecto; sin embargo, para las líneas de unión, el área del punto de inyección y la temperatura del molde influyen en el movimiento de esas líneas.

CAPITULO 5

PROTOCOLO DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

Ya obtenidos los datos del proceso de inyección y su influencia respecto al control de los defectos estudiados, a continuación se presenta la propuesta de un protocolo a seguir que el proceso de inyección tenga una optimización controlada.

Antes de hacer el moldeo, se hace un análisis de flujo para poder visualizar los posibles defectos así como posibles problemas que se pueden presentar durante el proceso, dicho análisis se recomienda llevarlo a cabo con un simulador de flujo como el mold flow o Moldex3D .

Después de haber hecho la simulación se procede a seguir los siguientes puntos:

-Determinar su almacenamiento.

-Establecer la fuerza de cierre del molde y/o determinar el tonelaje de la máquina de inyección.

-Fijar la velocidad del husillo (RPM's).

-Fijar la contrapresión.

-Fijar temperaturas de equipos periféricos.

-Se plantea el moldeo científico.

Generación de la curva de viscosidad.

Estimación del balanceo de cavidades.

Realizar el gráfico de caída de presión.

Realizar la ventana de proceso.

Realizar el gráfico del tiempo de enfriamiento del punto de inyección.

Determinar el tiempo de enfriamiento de la pieza.

A partir del moldeo científico se obtienen las variables más importantes del proceso y se procede a fijarlas para observar las piezas y determinar si se necesita aplicar un moldeo robusto, es decir, aplicar un DoE.

-Ajuste de la expulsión de las piezas

a) **Fuerza de expulsión.**

b) **Velocidad de expulsión.**

Éste ajuste va de la mano con la programación del molde para poder sincronizar la expulsión con los movimientos del robot o si es el caso que el proceso sea semi-automático, es decir, que un operador se encargue de extraer la piezas.



Figura 5.1.- Robot de la marca Wittmann modelo 831.

- Se observan los defectos en las piezas

Existen defectos que se le pueden atribuir a otros aspectos diferentes a lo antes mencionado, eh aquí la importancia que se le debe de dar a lo mencionado a los capítulos anteriores, como por ejemplo: secado de la resina, mezcla de materiales, humedad del medio ambiente, etc.

DURANTE EL PROCESO

Alimentación de tolva constante: Aunque parezca obvio, suele pasar que la tolva se llega a quedar vacía por descuido y/o por una falla del alimentador, es por ello que se debe tener vigilada para evitar que se vacíe o que esté obstruida y no deje el libre paso del material.

Observar la tabla de valores reales arrojados por la máquina, como por ejemplo el cojin de masa, la descompresión, la temperatura del aceite, tiempo de ciclo, etc., esto debido a que muchas veces se ajusta la máquina y al paso del tiempo se presentan defectos en la pieza que son provocados por la máquina o por el mismo operador.

Dimensionar las piezas y establecer pesos máximos y mínimos; y si es el caso, ensamblar piezas con su contraparte, una vez que la pieza deja de contraer; que de acuerdo a datos experimentales reportados en la literatura es de 24 horas.

Recopilar los parámetros y plasmarlos en un documento, para tenerlos de referencia para la siguiente corrida de producción.

Dar las instrucciones a seguir al personal de operación siguiendo el flujo de proceso de inyección en base a la pieza a generar.

CONCLUSIONES.

- A partir del presente trabajo se observó que en diferentes empresas manufactureras en el ramo de inyección de plásticos, se realiza su proceso, optimización y producción en base de la experiencia del operador y no se lleva a cabo una metodología estándar para la puesta en marcha de la máquina.
- Los parámetros encontrados a partir de diferentes alternativas, difieren en cuestión cuantitativa, los valores son muy diferentes, pero en cuestión cualitativa son muy parecidos, y esto se nota ampliamente en el simulador de flujo donde predecía en que partes de la pieza, la calidad va a ser deficiente y al realizar las piezas se observó que las áreas señaladas por el simulador estaban presentes los defectos principales.
- El protocolo propuesto en el presente trabajo, se puede aplicar para la obtención de los parámetros mas importantes del proceso de inyección de plástico en moldes nuevos o cambio de resina en un molde, esto es importante ya que la mayoría de las veces los moldes son probados cambiando de parámetros aleatoriamente sin que se lleve un control de ello, aunque es necesario la utilización de mucho material en la aplicación del protocolo, pero al final se identifican los valores más óptimos a utilizar durante la producción y se tiene un registro de los defectos encontrados con diferentes valores en los parámetros, además es una herramienta que ayuda a optimizar el proceso.
- En comparación de la experiencia laboral contra el protocolo, en el primero se puede obtener piezas aceptables en todos los aspectos y sin necesidad de la utilización de mucho material, pero cuando el molde es cambiado varias veces, es decir , se desmonta y se vuelve a montar, los parámetros ya nos son los mismos con los que se probó, estos valores pueden variar hasta un 20%, pero con la cantidad de variables que se manejan, los cambios de parámetros son bastantes, en cambio con el protocolo, los valores obtenidos siempre van a ser los mismos (por cierto tiempo, esto va en función del desgaste de la máquina y del molde). Además se relaciona la viscosidad del material con la velocidad de inyección dentro de la cavidad, y varios valores se determinan a partir de valores y no de “experiencia del operador”.
- Las desventajas del moldeo científico es el uso de mucho material para realizar las pruebas y el tiempo invertido en ello, además que el moldeo científico no se puede aplicar del todo con materiales plásticos de ingeniería.
- El análisis estadístico sirve para identificar las variables que afectan a la pieza de una forma cuantitativa, esto toma importancia ya que no se basa en la experiencia del operador.

Trabajos a futuro.

- Probar el protocolo en otros moldes con diferentes materiales.
- Redefinir los pasos del protocolo en base a un estudio de comportamiento del mismo, de tal manera que se permita asegurar una buena respuesta que incluya una reducción de tiempos al aplicarlo, así como de material.
- Implementación del protocolo en la industria.

Bibliografía:

[1] [http:// www.ticona.com](http://www.ticona.com)

[2] S.Kulkarni, Robust Process Development and Scientific Molding, 1 ar ed. Asia Pasific Buisness Press. Inc, 2012

[3] <http://www.quimicaorganica.org>

[4] IMPI, Enciclopedia del Plástico, Vol 1,2,3,4, 2da ed. Centro Empresarial del Plástico, 1999.

[5]http://www2.dupont.com/Plastics/es_US/centro_conocimiento/procesamiento/moldeo_por_inyeccion/

[6]Callister William D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Edit. REVERTE, Tomo II, España, 1996.

[7] Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc, 2005.

[8] www.eleconomista.es

[9] Charles A. Harper, Manual de plásticos, McGraw-Hill Interamericana, 2004.

[10] <http://www.plastico.com>