



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE MOLDEABILIDAD DE PIEZAS LARGAS OBTENIDAS POR
INYECCIÓN DE PLÁSTICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

M E C Á N I C A

P R E S E N T A :

RAMÓN FLORES GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ÁLVARO AYALA RUIZ



MEXICO, D.F. OCTUBRE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION.....	4
CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	6
1.1. INTRODUCCIÓN	6
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	6
1.2.1. RECHUPES, MARCAS DE HUNDIMIENTO Y/O VACIOS.....	7
1.2.2. LÍNEAS DE SOLDADURA.....	8
1.2.3. AIRE ATRAPADO	9
1. 2.4. REBABAS.....	10
1.2.5. MARCAS DE FLUJO.....	11
1.2.6. PIEZAS INCOMPLETAS	11
1.2.7. MARCAS DE EXPULSIÓN VISIBLES	12
1.2.8. DIFICULTAD DE EXPULSIÓN DE LA PIEZA	12
1.2.9. ESTANCAMIENTO DEL FLUJO	13
1.2.10. MARCAS DE ONDA	13
1.2.11. VARIACIÓN DIMENSIONAL	14
1.2.12. CONTRACCIÓN	15
1.2.13. FRAGILIDAD.....	15
2.1.14. PANDEO.....	16
CAPITULO 2. DEFINICIÓN DE NECESIDAD Y SOLUCIÓN	18
2.1. INTRODUCCIÓN	18
2.2. NECESIDAD.....	18
2.3. SOLUCION.....	18
2.4. OBJETIVO Y ALCANCES	18
CAPITULO 3. MOLDEABILIDAD.....	20
3.1. INTRODUCCIÓN	20
3.2. MOLDEABILIDAD.....	20
3.3. ESTADO DEL ARTE	22
3.4. MÉTODO TAGUCHI	25
3.5. ANOVA.....	29

CAPÍTULO 4. PROCESO DE ANÁLISIS DE MOLDEABILIDAD DE PIEZAS LARGAS.....	33
4.1. INTRODUCCIÓN	33
4.2. CASO DE ESTUDIO	33
4.3. DEFINICIÓN DE PIEZAS LARGAS.....	34
4.4. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	35
4.4.1. VARIABLES QUE CAUSAN PANDEO	36
PRESIÓN DE EMPAQUETAMIENTO	37
TEMPERATURA DEL MOLDE	37
TEMPERATURA DE LA MASA FUNDIDA	37
TIEMPO DE ENFRIAMIENTO	38
ESPESOR DE LA PARED	38
UBICACIÓN DEL PUNTO DE INYECCIÓN	38
UBICACIÓN DEL SISTEMA DE CANALES DE INYECCIÓN	39
4.4.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	39
DEFINICIÓN DE FACTORES	40
CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS	41
DEFINICIÓN DE NIVELES	42
DEFINICIÓN DEL ARREGLO.....	42
PROCESO DE SIMULACIÓN DE ANÁLISIS DE FLUJO	45
 CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	 49
5.1. INTRODUCCIÓN	49
5.2. PUNTOS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS DE PANDEO	49
5.3. RESULTADOS DE ANOVA	51
 6. CONCLUSIONES	 53
 7. APÉNDICE.....	 55
 8. REFERENCIAS.....	 56

INTRODUCCIÓN

Se sabe que a partir de la variación de los parámetros que intervienen en el proceso de inyección, como son temperatura de la masa fundida, presión de empaquetamiento, temperatura del molde y las características de la pieza, es complicado predecir la calidad de la pieza, a pesar de contar con software especializado, por lo que los ajustes o correcciones de la pieza y molde se realizan a pie de máquina [1].

Para mejorar el diseño de piezas plásticas, se han estudiado los parámetros que tienen una mayor influencia en la deformación de la geometría en piezas inyectadas. Lo anterior es conocido como moldeabilidad y es una etapa dentro del diseño conceptual del producto, con el fin de mejorar la calidad de piezas plásticas durante su fabricación [2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 23].

Se han reportado trabajos que utilizan diferentes técnicas y herramientas para evaluar la moldeabilidad de piezas de inyección de plástico, dónde se estudian piezas con geometría y problemas específicos, tal es caso de Babur Ozcelik e Ibrahim Sonat [2] quienes analizaron la influencia de los parámetros de inyección utilizando el método Taguchi; Ching-Piao Chen y Ming-Tsan Chuang [3] utilizaron una aplicación de CAE integrada con técnicas estáticas para reducir la variación del pandeo; Gordillo A. y Ariza D. Sánchez-Soto [4] hicieron una predicción de contracción y pandeo de piezas plásticas en materiales semi-cristalinos en C-Mold. Sin embargo, hasta el momento no se tiene caracterizada de manera cuantitativa la relación y los efectos de los parámetros que intervienen en el proceso de inyección de piezas largas.

El pandeo es un comportamiento de contracción anisotrópica, que sufre la pieza durante el proceso de inyección, ocasionando dimensiones fuera de tolerancia, y deformación en la parte plástica. Los factores que ocasionan el pandeo son: encogimiento térmico asimétrico, comportamiento del material anisotrópico y tensión térmica debido a los efectos geométricos.

A partir de la premisa anterior, el objetivo de este trabajo es proponer una metodología para medir la moldeabilidad de piezas plásticas largas, así como, identificar los criterios de

evaluación, tales como el pandeo. Con la idea de encontrar la relación cuantitativa que existe entre el pandeo, la temperatura de la masa fundida, temperatura del molde, presión y tiempo de empaquetamiento, tiempo de inyección y tiempo de enfriamiento, se realizaron simulaciones de flujo de una pieza larga fabricada de Polipropileno, 40 % Fibra de plástico y 10 % Talco, con lo que se encontró que la presión de empaquetamiento es inversamente proporcional a la tendencia del pandeo de la pieza.

Así mismo, se utilizó el método Taguchi que es una herramienta de diseño y optimización de productos, obteniendo el óptimo perfil de parámetros en el proceso de inyección de piezas largas utilizadas en electrodomésticos. Se utilizó análisis de varianza (ANOVA) para identificar la magnitud relativa del efecto de cada factor, los resultados obtenidos muestran que el efecto de la presión de empaquetamiento presenta el mayor impacto con un 52.8%; la temperatura de la masa fundida tiene una influencia del 13.78% y el tiempo de enfriamiento y tiempo de empaquetamiento tienen un peso de 8.01 y 8.39% respectivamente. La temperatura del molde y el tiempo de inyección no presentaron efectos significativos en el análisis.

Para lograr el objetivo, el presente trabajo se desarrolló de la siguiente manera: En el capítulo 1, se presenta la descripción del problema, haciendo referencia a los defectos que ocasionan calidad indeseable en la pieza plástica; en el capítulo dos, se presenta la definición de la necesidad, la propuesta de solución y el criterio de evaluación de moldeabilidad; en el capítulo 3, se presenta los antecedentes referentes a la moldeabilidad de plásticos, así como una recopilación del estado del arte acerca del tema; en el capítulo 4, se presenta el desarrollo experimental del trabajo para evaluar la moldeabilidad del caso de estudio; finalmente, el capítulo 5 presenta el análisis de resultados que se obtuvieron a partir de las simulaciones de análisis de flujo y el análisis ANOVA, finalmente se presentan las conclusiones.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCION

En este capítulo se describe la problemática a la que se enfrenta la industria de electrométricos, desde el punto de vista de la deficiencia en la calidad y variación dimensional en piezas plásticas, fabricadas a partir del proceso de inyección. Desde el punto de vista del molde de inyección, variables de proceso, consideraciones de la maquina y del material, se analiza los defectos de piezas plásticas que surgen durante el proceso de inyección, así como sus causas y posibles soluciones.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Generalmente en el proceso de moldeo de inyección de plástico, los requerimientos de las piezas tienen tolerancias dimensionales cerradas, los materiales presentan altos valores de contracción y la variabilidad de los parámetros del proceso mismo ocasiona grados de pandeo, esfuerzos internos en la pieza y defectos en las piezas. Por lo tanto, es complicado predecir la calidad de la pieza, a pesar de contar con software especializado, por lo que los ajustes o correcciones de los defectos en la pieza y en el molde se realizan a pie de máquina [5].

La industria de electrodomésticos ha incorporado tecnología en diseño, desarrollo y fabricación de sus productos, con la idea de ofrecer productos de alta calidad y disminuir costos de producción. En los últimos años ha surgido un demandante uso de piezas de material plástico en la industria de aparatos electrodomésticos, proporcionando ventajas que favorecen la disminución de costos de producción. Las cinco principales ventajas en la implementación de piezas plásticas en aparatos electrodomésticos son: mejoramiento de apariencia, refiriéndose al brillo y calidad de la superficie; sustitución de otros materiales, principalmente del metal; menores costos de materia prima y transporte; estética y disminución del peso del producto. Por tales motivos, se han reportado trabajos asociados a cuestiones de apariencia y mejoramiento de calidad en piezas plásticas, tal es el caso de Jin Cheng et al. hicieron una optimización de inyección basándose en una evaluación de moldeabilidad a partir de lógica difusa [10] y Ozelik et al. hicieron una comparación de la optimización de un análisis

de pandeo utilizando ANOVA y redes neuronales; Cruz et al. [21] analizaron resinas poliéster como una manera de conseguir brillo en piezas largas y como una posible alternativa de sustituir resinas termofijas y Flores et al. realizaron una evaluación de la relación geometría-rigidez en piezas plásticas, utilizando costillas y cartabones como refuerzos [1].

Así mismo, es frecuente que las piezas obtenidas mediante el proceso de inyección de plástico no cumplan con los requerimientos pre-establecidos de diseño y sufran defectos indeseables. Los defectos en partes moldeadas requieren experiencia tanto para ser identificados como para ser evitados. Existe una gran variedad de defectos asociados a cuestiones estructurales y de estética, tales como: aire atrapado, rayas y marcas negras, fragilidad, marcas de quemadura, delaminación, variación dimensional, decoloración, ojos de pescado, rebabas, marcas de flujo, estancamiento del flujo, inyección a chorro (*jetting*), ondas, piezas incompletas, rechupes o marcas de hundimiento, contracción, líneas de soldadura y pandeo.

Para estudiar los defectos en el proceso de inyección de plástico, a continuación se presenta la descripción y posibles soluciones de defectos estructurales asociados principalmente a variaciones dimensionales que sufren las piezas plásticas.

1.2.1. Rechupes, marcas de hundimiento y/o vacíos.

Las marcas de hundimiento es una depresión local en la superficie de la pieza, que ocurre en secciones gruesas o localizadas por encima de costillas, alojamientos y filetes internos. Algunas causas son las siguientes: contracción del material en las secciones gruesas sin suficiente compensación al momento de la fase de enfriamiento, es decir, excesiva contracción en la sección; baja presión de inyección y de empaquetamiento, así como disparo insuficiente del material; tiempo insuficiente de empaquetamiento y enfriamiento; alta temperatura de la masa fundida y del molde.

Posible solución:

- Se puede rediseñar los espesores de refuerzos y/o alojamientos por encima de la pared.

- Respecto al diseño del molde, se puede incrementar el tamaño de los puntos de inyección y canales de inyección para retardar el tiempo de enfriamiento, esto permitirá que el material se empaque de una forma más adecuada en la cavidad; se puede relocalizar el punto de inyección cerca de la sección más gruesa, lo cual permitirá que se empaque antes que la sección delgada y agregar más respiraderos, lo cual permitirá que el aire atrapado dentro de la cavidad, tenga salida.
- Respecto a las condiciones de moldeo se puede recomendar lo siguiente: Incrementar la presión de inyección y de empaquetamiento; incrementar el tiempo del tornillo de avance y disminuir la tasa de inyección; disminuir la temperatura de la masa fundida y de la pared del molde; incrementar el tiempo de enfriamiento y observar que no haya retorno de material o una posible fuga de material por alguna válvula [14].

1.2.2. Líneas de soldadura

Las líneas de soldadura se forman cuando frentes de flujo viajan en direcciones opuestas [1]. Las líneas de soldadura pueden ser causados por hoyos o insertos en la pieza, múltiples puntos de inyección y espesor de pared variable. Este defecto es indeseable en las piezas moldeadas, sobre todo cuando la apariencia es importante, lo cual es cierto con materiales de fibras reforzadas, por que las fibras no superan las líneas de soldadura y a menudo se encuentran orientadas paralelamente.

La fuerza de soldadura depende de la capacidad de los frentes de flujo para soldarse entre sí. La fuerza de soldadura puede ser de 10 a 90%, tan fuerte como la pureza del material. Las condiciones favorables para la mejorar la calidad de una línea de soldadura es alta presión y velocidad de inyección, alta temperatura de la masa fundida y del molde, formación de las líneas de soldadura los más cercanas al punto de inyección y diferencias de menos de 10 °C entre los dos frentes de flujo.

Posible solución:

- Respecto al diseño de la parte, se puede incrementar el espesor de pared, lo cual facilitará la transmisión de la presión y mantenimiento en una más alta temperatura de la masa fundida.
- Ajustar el punto de inyección.
- Respecto al diseño del molde, se puede incrementar el tamaño del punto y canales de inyección.
- Respecto a las condiciones de moldeo, se debe incrementar la temperatura de la masa fundida, velocidad de inyección y presión de inyección [14].

1.2.3. Aire atrapado

El aire atrapado se encuentra dentro de la cavidad al no poder escapar por los orificios del sistema de venteo del molde o por la falta de líneas de venteo, que es una causa común del origen de este defecto. Otra causa común es la tendencia del material fundido a fluir en secciones más gruesas [14]. Otras posibles causas del aire atrapado es el grado de humedad del material y temperatura desigual en el molde [1].

Posible solución:

- Respecto al diseño de la pieza, se debe reducir el espesor para evitar la tendencia del material fundido a fluir por secciones gruesas.
- Respecto al diseño del molde, se debe poner especial atención en la localización del sistema de venteo, así como re diseñar el sistema de punto de inyección y distribución del material, es decir, cambiar el sistema de canales de inyección, alterará el patrón de llenado de tal manera que se debe ubicar adecuadamente el sistema de ventilación.
- Respecto a las condiciones de moldeo, se debe reducir la velocidad de inyección, lo cual dará un adecuado desplazamiento del aire, mientras termina de inyectar la masa fundida, para escapar por el sistema de venteo. Velocidades altas ocasionan el defecto *Jetting*.

1. 2.4. Rebabas

Las rebabas es un efecto causado por excesivo material localizado en la separación de las placas del molde, notablemente en la superficie de partición. Algunas causas que ocasionan este defecto son las siguientes: Insuficiente fuerza de cierre de la máquina de inyección; la superficie de partición no hace contacto completamente, debido a alguna deformación estructural del molde o máquina inadecuada; condiciones de molde inadecuadas, tales como alta temperatura de la masa fundida, así como la presión de inyección; un inadecuado sistema de venteo, viscosidad baja del material, poca resistencia al flujo y excesiva alimentación del material [14, 25, 26].

Posible solución:

- La rigidez de los platos del molde debe ser suficiente para evitar la deformación durante el moldeo.
- Adecuar las condiciones del sistema del venteo. Se recomienda que el tamaño de los canales de ventilación sea de 0.025mm para materiales cristalinos y 0.038mm para materiales plásticos amorfos [14].
- Limpiar la superficie del molde, en ocasiones el molde no cierra completamente debido a que queda material extra en la superficie del molde.
- Básicamente el molde y la máquina de inyección interviene para que haya un adecuado sellado entre las placas del molde. Se debe incrementar el tamaño de la máquina y ajustar la capacidad de la fuerza de cierre [14].
- Respecto a las condiciones del moldeo se recomienda disminuir la temperatura del depósito y de la boquilla, ya que a altas temperaturas del material, se reduce la viscosidad del mismo. Así mismo, se recomienda disminuir la presión de inyección y de empaquetamiento e incrementar el tiempo de inyección o reducir la velocidad de inyección.

1.2.5. Marcas de flujo

Las marcas de flujo son defectos que aparecen cerca del punto de inyección en forma de ondas circulares. Este defecto es causado debido al enfriamiento del material cerca del punto de inyección o a la falta de compensación del material durante la fase de empaquetamiento. Algunas otras causas que se atribuyen al origen de este defecto son las siguientes: baja temperatura de la masa fundida, baja temperatura del molde, baja velocidad de inyección, baja presión de inyección y tamaño insuficiente del punto y canales de inyección.

Posible solución:

- Cambiar la fuente de enfriamiento en el sistema de canales de inyección para atrapar el material frío durante el estado de llenado. La longitud adecuada de la fuente de enfriamiento es equivalente a la del diámetro de los canales de inyección.
- Adecuar el tamaño de los canales de inyección y del punto de inyección para el tipo de molde y material. Algunas veces las marcas de flujo son ocasionadas por un inadecuado diseño en los canales de inyección y el tamaño del punto de inyección, que al enfriarse prematuramente, el material no puede ser compensado en la fase de empaquetamiento.

1.2.6. Piezas incompletas

La principal causa se refiere al insuficiente volumen de material inyectado, además de limitaciones en restricciones en el flujo de la masa por problemas de obstrucción de aire, insuficiente presión de inyección y enfriamiento prematuro en la sección de los canales de inyección y punto de inyección [1].

Posible solución:

- Aumentar el volumen del material.
- Aumentar la presión de inyección.
- Verificar y limpiar el sistema de refrigeración del molde.

- Limpieza del sistema de veteo.

1.2.7. Marcas de expulsión visibles

Este defecto es ocasionado por causas mecánicas tales como diseño inadecuado del molde, de la pieza o del sistema de expulsión; causas térmicas cuando hay diferencias de temperatura entre el expulsor/botador y la pared del molde y si la fuerza de expulsión es mayor a la requerida [1].

Posible solución:

- Verificar la temperatura del molde y la fuerza de expulsión.

1.2.8. Dificultad de expulsión de la pieza

Algunas causas que ocasionan dificultad para extraer las piezas del molde es el excesivo empaquetamiento en la cavidad, defectos en el molde (acabado superficial), enfriamiento excesivo y falta de ángulo de salida [1, 26].

Posible solución:

- Regular la temperatura del molde.
- Disminuir la presión de empaquetamiento.
- Cambiar el material a uno de menor fluidez [[26]].
- Rectificar la superficie del molde.
- Verificar el ángulo de salida.
- Cambiar el molde en última instancia [1].

1.2.9. Estancamiento del flujo

Estancamiento del flujo es un defecto superficial que resulta de la obstrucción del flujo del material fundido sobre una sección delgada o una zona con variación abrupta de espesor [14]. Este defecto se puede prevenir re ubicando el punto de inyección o modificando el espesor de pared.

Cuando la fusión del polímero es inyectado en la cavidad, tiende a llenar las zonas más gruesas y con menos obstrucciones. Como resultado, la fusión del polímero puede estancarse en una sección delgada hasta el resto del llenado de la pieza y la fusión del polímero estancada empieza a moverse nuevamente. Por lo tanto, si la duración del estancamiento del flujo es significativa, el polímero solidificará prematuramente en el punto de estancamiento.

Posible solución:

- Reducir las variaciones de espesor de la pared, como sea posible.
- Posicionar el punto de inyección fuera de las áreas de secciones delgadas o regiones con cambios de espesores repentinos. De esta manera el defecto se producirá en un momento posterior, y por un período más corto y resultará del estancamiento del flujo de la masa fundida.
- Incrementar la temperatura de la masa fundida y la presión de inyección.

1.2.10. Marcas de onda

El defecto marcas de onda son pequeñas olas, similares a huellas dactilares, ubicadas cerca de la orilla o al final del flujo y es causado por la parte del frente del flujo del enfriamiento del material o de la pared de la cavidad. La velocidad del flujo y la temperatura del molde tienen una grande influencia en la formación de ondas en comparación con la forma del punto de inyección y la temperatura de la masa fundida.

Posible solución:

- Incrementar el espesor de la pared.
- Asegurar que el sistema reológico sea adecuado para la pieza.
- Diseñar el óptimo sistema de venteo a lo largo del molde, especialmente al final del flujo. Asegurar que el sistema de venteo es suficiente para que el aire presente en la cavidad pueda escapar durante la inyección.
- Incrementar la temperatura del molde.
- Incrementar la velocidad de inyección. Esto reducirá la viscosidad de la fusión.
- Incrementar la presión de inyección. Ser cuidadosos en no exceder la capacidad de la máquina de inyección. La presión de inyección de operación normalmente debería ser entre el 70 y 85% de la presión máxima de la máquina, para prevenir daños a la máquina.
- Incrementar la temperatura de la masa fundida. Ser cuidadoso de no introducir material degradado al aplicar la temperatura.

1.2.11. Variación dimensional

Este defecto es caracterizado por la alteración dimensional de la pieza moldeada. Algunas causas que ocasionan la variación dimensional es el inestable control de la máquina, condiciones impropias de moldeo y propiedades inestables del material.

Posible solución:

- Seguir las indicaciones del fabricante del material para llevar a cabo el proceso de pre secado del material.
- Limitar el porcentaje de material triturado añadido al material de origen. El tamaño de las partículas irregulares puede causar distintos niveles de material mezclado y dar lugar a variaciones dimensionales inestables en la pieza moldeada. [14]

- Ajustar el sistema de inyección en caso de que la pieza tenga variaciones dimensionales o se distorsione durante la inyección.
- Diseñar los canales y punto de inyección para el molde y el material en uso.
- Reemplazar las bandas de calor o termopar, en caso de que se encuentren fuera de las condiciones óptimas, ya que puede causar flujo inestable.
- Incrementar la presión y tiempo de inyección y tiempo de empaquetamiento, para asegurar que el material es inyectado en la cavidad durante la fase de llenado y de empaquetamiento.
- Asegurarse que la temperatura del molde es nivelada por el sistema de enfriamiento.

1.2.12. Contracción

Disminuye el volumen a medida que se enfría el plástico y existe un insuficiente tiempo de enfriamiento [1].

Posible solución:

- Incrementar la presión de mantenimiento.
- Incrementar el tiempo de cierre (incremento del tiempo de enfriamiento).
- Adecuar el punto y canales de inyección.
- Variaciones en el espesor de la pared.

1.2.13. Fragilidad

La fragilidad de una pieza moldeada es su tendencia a romperse o agrietarse. Este defecto surge de la degradación del material (las moléculas del material adquieren menor peso molecular). Como resultado, la integridad física de la pieza es substancialmente menor que la especificada. La degradación del material es causada por condiciones inadecuadas de secado, inadecuadas temperaturas utilizadas, inadecuado sistema reológico del molde (canales y punto de inyección)

y debilidad de la pieza en la línea de partición. Otros defectos que surgen de las mismas causas son las marcas de quemadura, decoloración y manchas negras.

Posible solución:

- Asegurar que las condiciones de secado del material son las correctas. Así mismo, la fragilidad puede ser causada por excesivo tiempo de secado, fuera de las unidades volátiles del plástico, por lo que se vuelve más sensible al proceso o por la degradación del material por reducción del peso molecular.
- Reducir el triturado del material.
- Seleccionar el mejor diseño del tornillo para mezclar de una forma más adecuada al material utilizado.
- Reducir la temperatura de la boquilla, ya que el material será sobre calentado ocasionando la degradación del material y un cambio de color en la pieza.

2.1.14. Pandeo

El pandeo es un comportamiento de contracción anisotrópica, que sufre la pieza durante el proceso de inyección, ocasionando dimensiones fuera de tolerancia, y deformación en la parte plástica. Los factores que ocasionan el pandeo son: encogimiento térmico asimétrico, comportamiento del material anisotrópico y tensión térmica debido a los efectos geométricos (Fig. 1.1).

Todas las zonas de la pieza tendrán contracción paralela y perpendicular al flujo. En consideración, alta contracción causa pandeo, por lo tanto es necesario definir tres tipos de efectos de contracción:

- Efectos de orientación:

La diferencia de contracción puede ser debida a la orientación molecular o a la orientación de la fibra. La orientación de efectos incrementa la diferencia entre la contracción paralela y perpendicular.

- Efectos en el área de contracción:

El área de contracción, también llamada contracción diferencial, es definida como el cambio del área que ocurre debido a la contracción paralela y perpendicular. El área de contracción puede ser usada para comparar la diferencia de contracción entre regiones cercanas al punto de inyección y al final del llenado, mientras que los efectos de orientación pueden ser usados para comparar la variación de contracción en diferentes regiones dentro de una región.

- Diferencia de enfriamiento

El pandeo puede ser causado por la variación del enfriamiento. El problema más común es la diferencia de temperaturas de las caras del molde. El pandeo causado por la diferencia de enfriamiento es muy común en estructuras largas y de caja. El problema es causado en el interior de la pieza, siendo más difícil enfriar que en la parte de afuera, por lo tanto en el interior se presenta una temperatura de molde más alta, lo que provoca una diferencia en la contracción. Un efecto similar ocurre con la diferencia entre las secciones gruesas y delgadas, ocasionando concentración de esfuerzos internos.

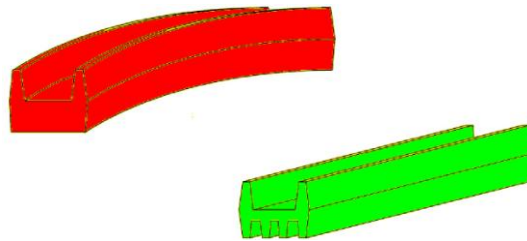


Figura 1.1. Pandeo de piezas plásticas [5].

CAPÍTULO 2. DEFINICIÓN DE NECESIDAD Y SOLUCIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

A partir de la problemática previamente analizada, en este capítulo, la necesidad es definida cómo el mejoramiento de la calidad dimensional de piezas largas de electrodomésticos, fabricada a partir del proceso de inyección de plástico. Además, se propone el criterio y las herramientas de solución del problema, en este caso se definió el defecto pandeo, como criterio de moldeabilidad para aumentar la calidad dimensional de piezas plásticas largas de electrodomésticos, finalmente se enlistan los alcances del trabajo.

2.2. NECESIDAD

Se requiere mejorar la calidad dimensional de piezas plásticas largas de electrodomésticos.

2.3. SOLUCION

Se sabe que el concepto de moldeabilidad está ligado al estudio de los defectos de las piezas inyectadas [6, 7, 8] y consecuentemente a la calidad de la pieza. Por lo tanto, se propone el mejoramiento de la calidad dimensional de piezas largas a través de establecer el defecto pandeo como un criterio de moldeabilidad. Así mismo, se integran otras herramientas tales como el diseño de experimentos (método Taguchi) y el uso de software especializado, para determinar la influencia en la deformación de la geometría en piezas largas de electrodomésticos fabricadas por medio del proceso de inyección.

2.4. OBJETIVO Y ALCANCES

A partir del defecto pandeo como criterio de análisis, el objetivo del presente trabajo es realizar el análisis de moldeabilidad de piezas largas obtenidas por inyección de plástico para obtener la mejora de calidad de dichas piezas. Los alcances del trabajo de análisis de moldeabilidad de piezas largas son los siguientes:

- Caracterizar las piezas plásticas largas de electrodomésticos.
- Analizar el estado del arte de la moldeabilidad.
- Analizar las condiciones y variables de proceso que causan pandeo.
- Proponer una metodología de análisis de moldeabilidad en piezas largas.
- Proponer criterios de moldeabilidad.
- Establecer los factores y niveles del diseño de experimentos con el método Taguchi, a partir del software especializado y de las especificaciones del fabricante del material.
- Establecer un caso de estudio.
- Realizar análisis de varianza del caso de estudio para obtener la magnitud relativa del efecto de las variables de proceso de inyección de piezas plásticas largas.
- Establecer o identificar los parámetros del caso de estudio que influyen en menor proporción al defecto pandeo.

CAPITULO 3. MOLDEABILIDAD

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se define el concepto de moldeabilidad, como parte de la etapa del diseño del producto y se hace una recopilación del estado del arte, dónde se describen las consideraciones de análisis de los trabajos que se han publicado en los últimos años acerca del tema.

3.2. MOLDEABILIDAD

Existe una gran cantidad de definiciones de moldeabilidad que están relacionadas con la facilidad de fabricar piezas plásticas. La moldeabilidad se considera una herramienta de evaluación de calidad de piezas plásticas que envuelve diferentes enfoques de análisis, tales como geometría y topología de entidades de la pieza [16], condiciones de procesamiento [2, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 23], defectos [2, 4, 6, 7, 10, 11, 12], características del molde [3].

En el presente trabajo, moldeabilidad se define como la factibilidad de que una pieza sea fabricada una pieza por medio del proceso de inyección de plástico, y se considera como una herramienta que permite predecir la calidad de las piezas plásticas, tanto cuantitativa como cualitativamente, a partir de un análisis de flujo e identificando la relación que existe entre los defectos que sufren las piezas inyectadas, y los parámetros que influyen en la calidad de las piezas inyectadas [24] (Fig. 3.1).

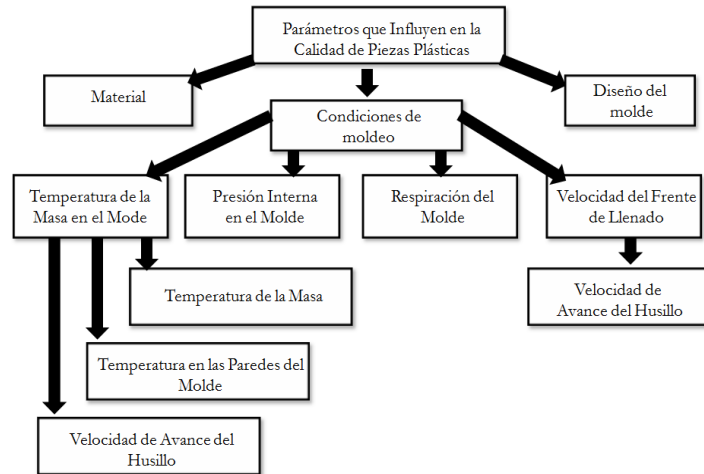


Figura 3.1. Calidad de la pieza plástica.

Se han reportado trabajos que utilizan diferentes técnicas y herramientas para evaluar la moldeabilidad de piezas de inyección de plástico, y se ha encontrado que los principales parámetros del proceso de inyección que influyen en el pandeo son: temperatura de la masa fundida, presión de empaquetamiento, tiempo de enfriamiento y temperatura del molde [2, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 23].

Con base en la literatura analizada, se encontró que existen dos diferentes enfoques para evaluar la moldeabilidad, por un lado la idea de mejorar la calidad de la pieza para cumplir con los requerimientos dimensionales, utilizando los diversos defectos como criterio de evaluación [9, 10] y por otro lado, se evalúa la geometría y topología de entidades (*features*) que conforman una pieza con reglas y recomendaciones de diseño para piezas fabricadas por el proceso de inyección de plástico, utilizando bases de datos [16, 17, 18], sin considerar el nivel de calidad de la pieza inyectada. Respecto al primer enfoque, la forma en que se mide la moldeabilidad se basa en metodologías experimentales, tales como método Taguchi, redes neuronales y lógica difusa, analizando las variables de proceso y utilizando como criterio principal la contracción y pandeo. En otros casos, se plantean índices de moldeabilidad a partir de una ponderación de peso en los defectos.

Así mismo, existe gran variedad de piezas utilizadas en los diferentes casos de estudio, tales como placas delgadas desde un 1mm de espesor; carcasas de teléfonos celulares y accesorios

para interiores de automóvil, pero hasta el momento no se han reportado trabajos de análisis de moldeabilidad considerando piezas largas [2, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 23].

Este trabajo presenta el estudio de moldeabilidad de piezas largas de electrodomésticos, durante la etapa del diseño conceptual en el desarrollo del producto (Fig. 3.2). Así mismo, se validó dicho estudio con un remate de estufa, fabricado de Polipropileno 40% de fibra de vidrio y 10% de carga mineral.

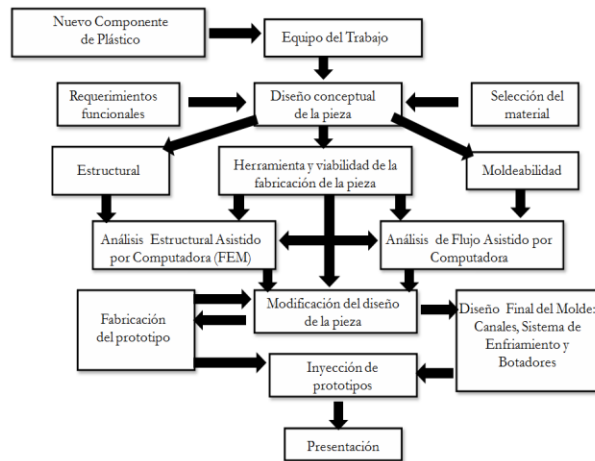


Figura 3.2. Moldeabilidad como parte del diseño del producto [5].

3.3. ESTADO DEL ARTE

En la literatura se han reportado diversos trabajos relacionados con el mejoramiento de la calidad de las piezas plásticas, desde diferentes puntos de vista dependiendo de la intencionalidad del área de diseño o manufactura. La gran mayoría de los trabajos se basan en el concepto de moldeabilidad [5], el cual se define y adapta según las necesidades y recursos del diseñador o fabricante del molde, es decir, cada autor propone sus propios parámetros, variables, reglas y criterios de diseño para evaluar y evitar los defectos en los diferentes tipos de piezas plásticas.

Jin Cheng y Jianrong [6] se dieron a la tarea de desarrollar la evaluación de moldeabilidad a partir de la teoría de lógica difusa, con el fin de lograr la optimización del proceso de inyección, desde el punto de vista del diseño del molde de inyección. Los mencionados autores, seleccionaron diez defectos de piezas de plástico como criterios de moldeabilidad, que surgen

durante el proceso de inyección, durante el llenado de la cavidad y durante la fase de empaquetamiento. Posteriormente, se utilizó lógica difusa para evaluar el peso de cada uno de los criterios de moldeabilidad, concluyendo utilizar los criterios de moldeabilidad: disparo corto, líneas de soldadura, rechupes, contracción volumétrica, aire atrapado y pandeo. Finalmente, de acuerdo al peso de los criterios de moldeabilidad, se evaluaron tres esquemas de trabajo, con características diferentes del molde de inyección, generando una matriz de evaluación y concluyendo que las piezas con mayor índice de moldeabilidad tienen un adecuado diseño del molde.

Considerando el correcto manejo de la máquina de inyección, como un factor importante para obtener una pieza plástica de buena calidad, Chiang y Chang [11] lograron optimizar los múltiples parámetros de funcionamiento de la máquina de inyección al inyectar una pieza moldeada, utilizando el método de lógica difusa.

Partiendo del concepto de diseño comparativo, Yin [14] generó posibles escenarios de cavidades de molde, considerando la geometría de la pieza. Seleccionó los mejores escenarios de cavidades, proponiendo un modelo para tomar decisiones con respecto a un conjunto de criterios relacionados con el número y volumen de corazones, planos de partición, profundidad y ángulos de salida.

Babur Ozcelik e Ibrahim Sonat analizaron los efectos que tenían los parámetros de inyección utilizando el método Taguchi [2, 11, 22]; Lau y Vagelatos y Juang [15] se dedicaron al desarrollo de un controlador de supervisión difuso para optimizar las variables del proceso de inyección de plástico; Ching-Piao Chen y Ming-Tsan Chuang utilizaron una aplicación de CAE integrada con técnicas estáticas para reducir la variación del pandeo [3]; Gordillo A. y Ariza D. Sanches-Soto hicieron una predicción de contracción y pandeo de la pieza plástica en materiales semi-cristalinos en C-Mold [4, 5].

Fei Yin y Huajie Mao [9] utilizaron redes neuronales para analizar la tendencia del pandeo y optimizaron los parámetros de proceso, tales como temperatura del molde, temperatura de la masa fundida, presión de empaquetamiento, tiempo de empaquetamiento y tiempo de enfriamiento. La optimización del pandeo de la pieza en estudio, utilizando los parámetros propuestos fue de 32.99%.

Huang y Tai [7] argumentan que son diversos los factores que ocasionan defectos en las piezas plásticas, tales como el material, tipo de máquina de inyección, geometría de la pieza, selección del líquido refrigerante y la ubicación de los canales de enfriamiento. Huang realizó una búsqueda para determinar las condiciones óptimas de moldeo por inyección de plástico, a partir del diseño de experimentos con el método Taguchi, utilizando C-Mold para realizar las simulaciones de inyección. Un segundo objetivo del trabajo de Huang es analizar el grado de pandeo de una pieza delgada con un material amorfo PC/ABS. Los resultados muestran que la presión de empaquetamiento tiene mayor influencia en el pandeo, con una contribución del 16% en el proceso; seguida de la temperatura del molde, con un 12.14% de contribución en el proceso; temperatura de la masa fundida, con una contribución del 10.76% en el proceso y el tiempo de empaquetamiento, con un 9.61% de contribución en el proceso.

Un problema que se presenta durante el desarrollo de los productos, es la no comunicación ni captura de información entre los diferentes equipos que realizan las actividades durante el desarrollo del producto de piezas plásticas, este es un enfoque diferente de moldeabilidad que se basa en principios de diseño y privilegia las características geométricas de las piezas. Como lo hacen Ahmed Al-Ashaab y A. Molina [16] que consideraron la coordinación, administración y conocimiento del ciclo de vida del producto, para introducir SPEED (*Supporting Plastic engineering Development*), que es un sistema que facilita compartir información y conocimiento entre los diferentes equipos, por medio de internet, acerca del proceso de inyección y provee reglas para moldeabilidad en características de la geometría como la pared, refuerzos, cavidades, etc. Así mismo Molina [17] menciona que los modelos de referencia se utilizan como soporte asistido por computadora y sirven para asistir la obtención de requerimientos para el sistema CAE, provee reglas para desarrollar sistemas CAE y organiza métodos y herramientas para introducir un mejoramiento sistemático en el desarrollo del CAE.

Para evitar ineficiencia en el diseño de productos de plástico o hacer correcciones posteriores, una preventiva exploración y evaluación de alternativas del producto reducirán dichos problemas, ayudando a incrementar la posibilidad del éxito de nuevos productos. Kwai-Sang y T.N.Wong [18], buscan aplicar un sistema basado en conocimiento (KBS) en el diseño y desarrollo de productos plásticos, y lo que ellos proponen es EIMPPLAN-1, que se desarrolló para ayudar al diseñador en la selección del material plástico y en las características del molde

de inyección durante el diseño conceptual del desarrollo de la pieza. Esto se logra basándose en las características geométrías, propiedades del material, información de manufactura y requerimientos, con un puente de información entre el diseño de la pieza y el diseño del molde.

Una necesidad que se ha suscitado en los últimos años, es la representación de productos y procesos de manufactura en sistemas CAE, que incluyen modelos computacionales basados en modelos de información, por medio de una base de datos, como lo ha hecho Ayala y Borja [19]. Así mismo, Okuno [20], utiliza el modelo del producto para asistir el diseño y manufactura de productos moldeados por inyección, donde los puntos de vista para realizar el modelo son tres: moldeabilidad, diseño y manufactura del molde. El punto de vista de moldeabilidad evalúa la estructura física de la pieza a inyectar, la cual está compuesta de características primarias y secundarias.

Por otro lado, Cruz y Trejo [21] mencionan una clasificación de piezas moldeadas por inyección de plásticos asistida por gas, donde incluyen piezas largas, tales como: tubos y piezas en forma de vara (*rod-shaped*); partes estructurales de cubiertas largas, como paneles automotrices; y cubiertas complejas con secciones delgadas y gruesas, utilizadas para ensamble. En este trabajo se estudiaron piezas en forma de vara con un largo de 760 mm de longitud.

3.4. MÉTODO TAGUCHI

En la revisión bibliográfica se registran diferentes técnicas de evaluación para lograr la optimización del proceso de inyección e identificar los efectos de las variables. La razón por la cual se utiliza el método Taguchi en este trabajo, es porque proporciona la medida de los efectos de las variables y la opción de utilizar arreglos ortogonales que simplifican el número de experimentos, sin necesidad de realizar todas las posibles combinaciones. En el presente trabajo, el número de experimentos debió haber sido ser $3^6=729$ (el número 3 se refiere a los niveles del experimento y el 6 al número de factores y/o variables), lo cual se simplificó a un arreglo L27, es decir, 27 experimentos.

El diseño experimental es un conjunto de pruebas, donde se realizan cambios sistemáticos y controlados respecto a las variables de entrada para medir el efecto de la variable de salida.

Dicho de otra manera, el diseño de experimentos es una efectiva forma para identificar las tendencias en procesos de manufactura y se ha implementado para identificar el rango de parámetros que aumentan o disminuyen la calidad del producto final.

En el método Taguchi, es posible incorporar la calidad en los productos desde su diseño, sin aumentar su costo; los problemas deben eliminarse en el laboratorio de diseño, no en la fábrica o en el campo [27]. Según esta perspectiva, es necesario diseñar productos robustos que toleren variaciones en el proceso de producción y durante el servicio de mantenimiento. Los métodos estadísticos muestran los factores importantes que afectan el diseño, Taguchi establece su metodología para:

1. Diseñar productos y procesos de acuerdo a las condiciones ambientales.
2. Diseñar y desarrollar productos a la mínima variación en sus componentes.
3. Minimizar la variación alrededor de un valor objetivo.

La metodología de Taguchi combina métodos estadísticos y de ingeniería para optimizar los procesos de diseño y fabricación de modo que aumente la calidad y se reduzca el costo del producto. El diseño de experimentos juega un papel esencial en el enfoque de Taguchi, pues ayuda a identificar los factores que más intervienen en la generación de problemas de calidad o, alternativamente, los factores que más contribuyen a lograr resultados positivos. A lo largo de este proceso, se fortalece la cooperación entre diversos niveles y áreas de la empresa.

La figura 3.3 muestra un esquema de actividades, desde la invención del producto hasta su llegada al mercado. El flujo se divide en tres etapas, conocidas por las expresiones inglesas *upstream*, *midstream*, y *downstream*. El diseño experimental y las técnicas de Taguchi se ubican en el primer bloque (*upstream*).

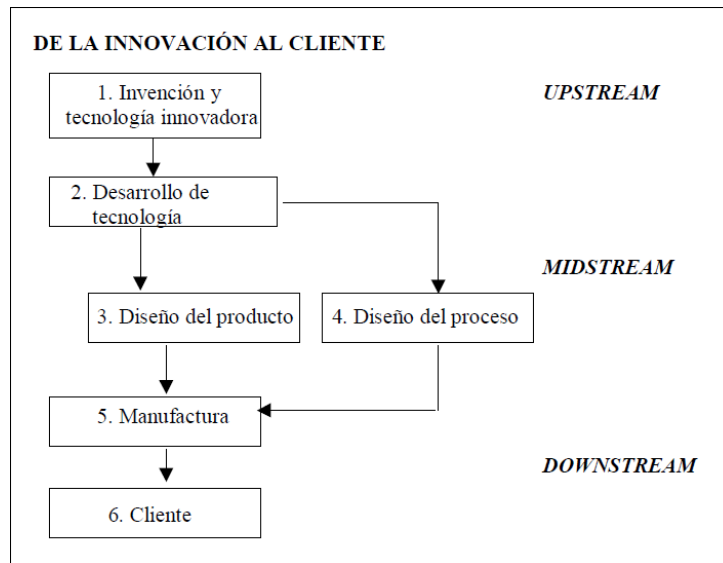


Figura 3.3. Esquema de actividades en el desarrollo del producto [27].

La calidad, antes que por la satisfacción de especificaciones, debe medirse en términos de la llamada función de pérdida, que establece la pérdida que la sociedad sufre como consecuencia de la mala calidad. Un producto de calidad es para el cliente aquél que cumple con las expectativas de rendimiento cada vez que lo utiliza, sin fallas y en cualquier condición o circunstancia. Los productos que no cumplen con dichas expectativas causan pérdidas, tanto para los clientes y los productores, como para el resto de la sociedad. Para Taguchi, la calidad debe medirse en función de la pérdida que causa: mientras mayor es la pérdida que se produce, menor es la calidad [27].

Métodos recomendados por Taguchi

Taguchi divide los factores de un experimento en factores controlables y factores incontrolables o ruido. Según la metodología de diseño de los parámetros, Taguchi recomienda seleccionar dos diseños experimentales, uno para los factores controlables y otro para el ruido. En general, estos diseños son del tipo ortogonal. Los diseños se combinan en el plan del diseño de los parámetros, un esquema de dos componentes:

- El arreglo de los factores controlables.
- El arreglo de los factores no controlables.

Para el análisis de datos, Taguchi recomienda evaluar el de los factores controlables promedio de cada corrida del experimento y analizar la variación de los resultados con una proporción señal-ruido (S/N). Se consideran óptimos los niveles de los factores que maximicen una proporción de señal-ruido adecuada. El objetivo del experimento es reducir la variabilidad alrededor de un valor objetivo determinado, o producir un efecto resultante lo mayor posible, o inversamente, producir el menor efecto posible.

En definitiva, el objetivo principal de la ingeniería en general es alcanzar mejoras de rendimiento ante cualquier condición durante la etapa *downstream* (Figura 4.3). Esto es lo que se llama robustez. Taguchi mide la robustez con la tasa de señal-ruido (S/N), mientras más robusta es una tecnología, más fuerte es la señal que emite contra cualquier ruido externo que trate de inhibir la fuerza de la señal.

Para Taguchi, el uso de la proporción señal-ruido elimina en general la necesidad de examinar las interacciones entre los factores controlables y los factores de ruido, si bien la prueba de estas interacciones puede ocasionalmente mejorar la comprensión de los procesos estudiados [27].

Taguchi enfoca dos principales áreas:

1. Define un arreglo ortogonal, el cual puede ser usado para diversas situaciones experimentales.
2. Esta ideado como un método estándar para el análisis de resultados, produciendo consistencia que rara vez se encuentra en otros métodos [8].

El primer componente del método Taguchi es el diseño de parámetros. Los parámetros son determinados tal que las características funcionales del producto son optimizadas, con la mínima sensibilidad de ruido, que incluye todos los factores de diseño incontrolables. El propósito del diseño de parámetros es minimizar la pérdida de calidad en el producto o proceso, resultado de los factores de ruido [6].

Los factores siguientes describen el procedimiento de diseño de parámetros [6]:

- Para determinar los factores y niveles efectivos: El número de niveles y factores serían incluidos, los niveles de cada factor se asignan por la experiencia, estudios preliminares o usando técnicas de lluvia de ideas.
- Para seleccionar el apropiado arreglo ortogonal: El arreglo ortogonal está compuesto por un número de filas y columnas. Cada columna representa uno de los factores del experimento y cada fila representa un ensamble de los factores con el nivel específico para cada prueba.
- Para seleccionar las apropiadas formulaciones de características de calidad, la tasa de SN (señal de ruido) es un índice de medida para ello. Esto es considerado como una señal para el promedio de las pruebas repetidas y el ruido de la varianza. La SN es definida por la ecuación 1:

$$\frac{S}{N} = -10 \text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^2 \right] \dots\dots\dots 1$$

- La mejor combinación de niveles de parámetros es cuando se obtiene la más alta tasa de SN. Hay una varianza mínima y la característica más cercana al objetivo es para ser producido bajo esos niveles de parámetros.

3.5. ANOVA

La varianza mide el grado de fluctuación de los datos correspondientes al factor o variable que se desea analizar, utilizando información proveniente de muestras para determinar si el proceso que se desea analizar produce diferentes resultados.

Suponga que tenemos diferentes niveles a (procesos) de un solo factor que deseamos comparar. La respuesta observada en cada uno de los a procesos es una variable aleatoria, los datos se pueden representar como en la tabla 3.1. Un dato en dicha tabla y_{ij} , representa la observación j -ésima tomada bajo el tratamiento i . En un principio consideramos el caso en que hay el mismo número de observaciones, n en cada proceso:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$i=1,2,\dots, a$

$j=1,2,\dots, n$

y_{ij} = Es la observación ij -ésima.

μ =Es un parámetro común para todos los procesos (media general).

τ_i = Es un parámetro asociado con el proceso i -ésimo.

ϵ_{ij} = Es un componente del error aleatorio.

Uno de los objetivos del análisis de varianza es probar ciertas hipótesis, respecto a los efectos de los procesos, así como estimarlos. Los errores del modelo se toman como variables aleatorias normal e independientemente distribuidas con media cero y varianza σ^2 .

El modelo de la ecuación y_{ij} , recibe el nombre de análisis de varianza de clasificación unidireccional debido a que solo se investiga un solo factor. Además se requiere que las observaciones se tomen en orden aleatorio, de manera en que el ambiente en que se usa el proceso a analizar (llamado unidad experimental), sea lo más uniforme posible. Lo anterior se llama diseño experimental completamente aleatorio (Tabla 3.1).

A continuación, se presentará el análisis de varianza para la clasificación unidireccional, donde los efectos del proceso τ_i suelen definirse como desviaciones de la medida general, por lo que

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \dots\dots\dots 2$$

Tabla 3.1. Datos para el análisis de varianza, en este caso de clasificación unidireccional [29].

Proceso	Observación	Totales	Promedio
1	$y_{11} y_{12} \dots y_{1n}$	y_1	\hat{y}_1
2	$y_{21} y_{22} \dots y_{2n}$	y_2	\hat{y}_2
.	.	.	.
.	.	.	.
a	$y_{a1} y_{a2} \dots y_{an}$	y_a	\hat{y}_a

Sea y_i la representación del total de las observaciones bajo el proceso i-ésimo, y \hat{y}_i , la representación del promedio de las observaciones bajo el proceso i-ésimo. De modo similar, considere que $y_{..}$ representa el total de todas las observaciones, y $\hat{y}_{..}$ la gran media de todas las observaciones. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$y_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \hat{y}_i = \frac{y_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \hat{y}_{..} = y_{..}/N \dots\dots\dots 3$$

Donde $N=an$ es el número total de observaciones. Se desea probar la igualdad de los a efectos del proceso, al emplear la ecuación 2, la hipótesis apropiada es:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_i: \tau_i \text{ diferente de } 0 \text{ para al menos una } i \dots\dots\dots 4$$

Esto es, si la hipótesis nula es verdadera, cada observación está compuesta por la media general μ más una conversión del error aleatorio e_{ij} .

El procedimiento de prueba para la hipótesis de la ecuación 4 se llama análisis de varianza. El termino análisis de varianza resulta de dividir la variabilidad total de los datos en sus partes componentes. La suma corregida total de los cuadrados, que es una medida de la variabilidad total en los datos, puede escribirse como:

$$\sum_{i=1}^a 1 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y} \dots)^2 = \sum_{i=1}^a 1 \sum_{j=1}^n [(\hat{y}_i - \hat{y} \dots) + (\hat{y}_{ij} - \hat{y}_i)]^2 \dots\dots\dots 5$$

El término del producto cruzado de la ecuación 5 es cero, por lo que:

$$\sum_{i=1}^a 1 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y} \dots)^2 = n \sum_{i=1}^a (y_i - \hat{y} \dots)^2 + \sum_{i=1}^a 1 \sum_{j=1}^n (\hat{y} - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots 6$$

La ecuación 6 demuestra que la variabilidad total de los datos, medida por la suma total corregida de los cuadrados, puede dividirse en la suma de los cuadrados de las diferencias entre las medias de los procesos o experimentos, la gran media y una suma de cuadrados de diferencias de observaciones dentro de los procesos y la media del proceso. Las diferencias entre las medias de procesos observados y la gran media, miden las diferencias entre procesos, en tanto que las diferencias de observaciones dentro de un proceso a partir de la media del proceso pueden deberse sólo a un error aleatorio. En consecuencia escribimos la ecuación 6 como:

$$SC_T = SC_{\text{PROCESOS}} + SC_E$$

Donde SC_T es la suma total de los cuadrados, SC_{PROCESOS} es la suma de los cuadrados debido a los procesos y SC_E es la suma de los cuadrados debido al error (dentro de los procesos). Hay $an=N$ observaciones totales, por tanto SC_T tiene $N-1$ grados de libertad. Hay a niveles del factor, por lo que SC_{PROCESOS} tiene $a-1$ grados de libertad. Dentro de cualquier proceso hay n replicas que proporcionan $n-1$ grados de libertad con los cuales se estima el error experimental. Puesto que hay n procesos, tenemos $a(n-1)=an-a=N-a$ grados de libertad para el error.

Considere ahora las propiedades distributivas de estas sumas de cuadrados. Puesto que hemos dado por hecho que los errores ϵ_{ij} son $(0, \sigma^2)$, las observaciones y_{ij} son $(\mu + \tau_i, \sigma^2)$. De manera que SC_T / σ^2 se distribuye como ji cuadrada con $N-1$ grados de libertad, ya que SC_T es una suma de cuadrados en variables aleatorias normales. También podemos mostrar que $SC_{\text{PROCESOS}} / \sigma^2$ es ji cuadrado con $a-1$ grados de libertad, si H_0 es verdadera y SC_E / σ^2 es ji cuadrada con $N-a$ grados de libertad. Sin embargo, las tres sumas de cuadrados no son independientes, puesto que SC_{PROCESOS} y SC_E suman SC_T [29].

CAPÍTULO 4.

PROCESO DE ANÁLISIS DE MOLDEABILIDAD DE PIEZAS LARGAS.

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presenta el desarrollo experimental, basado en el método Taguchi para realizar la evaluación de moldeabilidad del caso de estudio, con la idea de comprobar la metodología de moldeabilidad propuesta.

El caso de estudio seleccionado, es una pieza de plástico utilizada en electrodomésticos, dicha pieza tiene las características de contar con un sólo punto de inyección, espesor constante y la razón entre la longitud del recorrido del material y el ancho es > 7 .

4.2. CASO DE ESTUDIO

En la literatura se reportan trabajos donde se evalúa la moldeabilidad de diversas piezas de inyección de plástico, con geometría y problemas específicos. En este trabajo se pretende restringir el caso de estudio en lo que se ha definido como piezas largas, las cuales cuentan con características geométricas específicas, tales como: espesor constante, piezas con un punto de inyección, sección transversal constante y el recorrido del material inyectado cumple con la relación largo/ancho ≥ 7 . Este tipo de piezas presentan un comportamiento de deformación plástica, donde los efectos de pandeo son mayores en comparación con piezas que no cumplen con estas características, por ejemplo en las piezas que tienen más de un punto de inyección, se reduce la longitud del trayecto del material dentro de la cavidad de molde y por lo tanto el efecto del pandeo se ve disminuido. Existen piezas automotrices como los soportes de defensas que tienen gran longitud, que aparentemente se pueden considerar como piezas largas, pero el ancho de la pieza es variable, por lo que la relación largo/ancho no se cumple.

El caso de estudio pretende probar la metodología de análisis de moldeabilidad, donde se identificará el rango y la influencia de las variables que ocasionan pandeo, así como deficiente

calidad en la pieza, ya que hasta el momento no existe un criterio de caracterización del comportamiento de piezas largas.

La pieza a estudiar es un remate de estufa que cuenta con un punto de inyección, fabricado de material Polipropileno con 40% de fibra de vidrio y 10% de carga mineral, y donde el recorrido máximo de material es de 757 mm (Tabla 4.1, número de pieza. 5).

4.3. DEFINICIÓN DE PIEZAS LARGAS

En la literatura se reportan estudios de piezas con características y usos específicos, tales como piezas circulares, carcasas de teléfono celular, guanteras de autos que no exceden los 400 mm de longitud máxima, etc [2, 4, 6, 7, 10, 11, 12]. Para evitar confusiones en el tipo de piezas que se analizarán en este trabajo, es necesario definir las características geométricas que distingue a las piezas largas con las demás piezas inyectadas e identificar cuándo se considera una pieza larga. Las piezas largas están directamente relacionadas con la longitud del flujo que recorre el material dentro de la cavidad del molde a partir del punto de inyección, es decir, si la pieza tuviera más de un punto de inyección la longitud del recorrido del material disminuye y por lo tanto no se considera pieza larga y las condiciones de procesamiento son diferentes, además la sección transversal y el espesor deben ser constantes.

Con el fin de establecer un criterio en relación al recorrido del material dentro de la cavidad de la pieza, se caracterizaron cinco piezas de electrodomésticos de línea blanca y se establece como criterio la relación largo/ancho (Tabla 4.1) y que presenten un punto de inyección. Una pieza de plástico será considerada larga en este trabajo, si la relación largo/ancho es como mínimo 7. A partir de los datos que se muestran en la tabla 1, se concluyó que el caso 1 y 4 no se consideran piezas largas, la pieza 1 no cumple con la relación preestablecida (la relación largo/ancho=3.04) y la pieza 4 cuenta con más de un punto de inyección. Así mismo, los casos 2, 3 y 5 se consideran piezas largas para electrodomésticos, ya que presentan un punto de inyección y cumplen con la relación 7.6, 7.6 y 12.2, respectivamente.

Tabla 4.1: Caracterización de piezas largas.

Número de Pieza	Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)	Relación Largo/Ancho
1		752	247	3.04
2		760	100	7.6
3		760	100	7.6
4		745	Max:95 Min:75	Max:7.84 Min:9.93
5		757	Max:62 Min:52	Max:12.2 Min:14.46

4.4. DESARROLLO DEL TRABAJO

En la figura 4.1 se muestra el proceso utilizado para la evaluación de moldeabilidad y determinar las condiciones óptimas de moldeo de piezas largas de electrodomésticos, con el fin de minimizar el defecto pandeo. Primeramente, se identificaron las variables que producen pandeo y se definió el conjunto de variables que se analizaron. Se realizó el diseño de experimentos con el método Taguchi, definiendo los factores, niveles y arreglo ortogonal; previamente diseñada la pieza larga, se importa al software especializado para realizar el análisis de flujo, donde es necesario definir lo siguiente: malla del modelo, tipo de análisis, selección del material, encontrar el óptimo punto de inyección, diseño de canales de inyección y el sistema de enfriamiento del molde. Se obtuvieron los resultados del pandeo de las piezas para realizar el análisis de varianza (ANOVA), incluyendo el análisis de tasa S/N (señal de ruido), para finalmente concluir acerca de la calidad de la pieza.

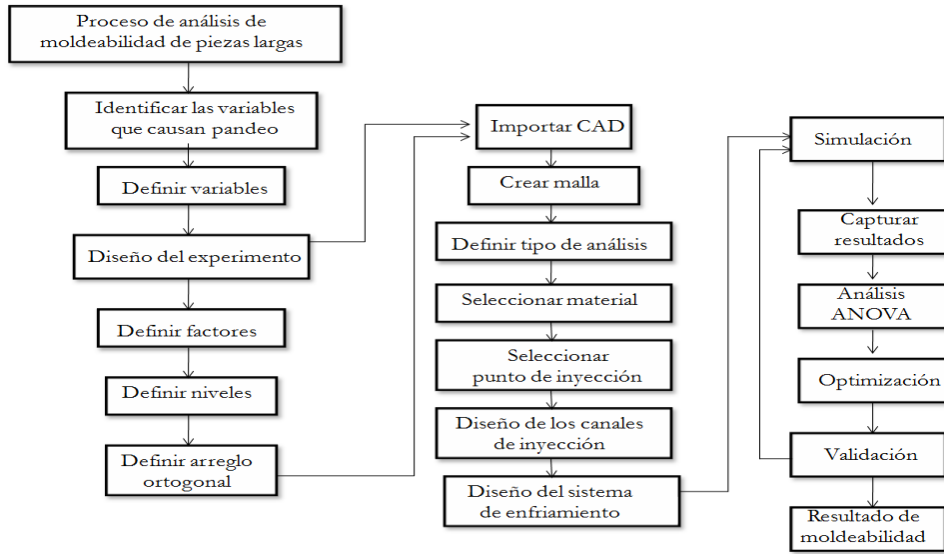


Figura 4.1. Proceso de análisis de moldeabilidad de piezas largas.

4.4.1. VARIABLES QUE CAUSAN PANDEO

Algunos factores que dan origen al defecto pandeo son: contracción térmica asimétrica debido al enfriamiento irregular de la pieza; no uniformidad en la contracción volumétrica; comportamiento anisotrópico del material debido a la orientación del flujo y deformación térmica diferencial, debido a los efectos de la geometría [28]. De acuerdo a lo anterior, existe relación entre las condiciones de las variables de procesamiento y la contracción y pandeo de la pieza, así como los efectos del espesor de pared de la pieza plástica; las curvas que se muestran en la figura 4.2 se aplican para la combinación de un material y un molde en particular. La contracción y el pandeo de una pieza plástica está en función de las variables de procesamiento, por lo tanto, las variables que tienen mayor importancia son las presiones, condiciones de llenado empaquetamiento y enfriamiento [14].

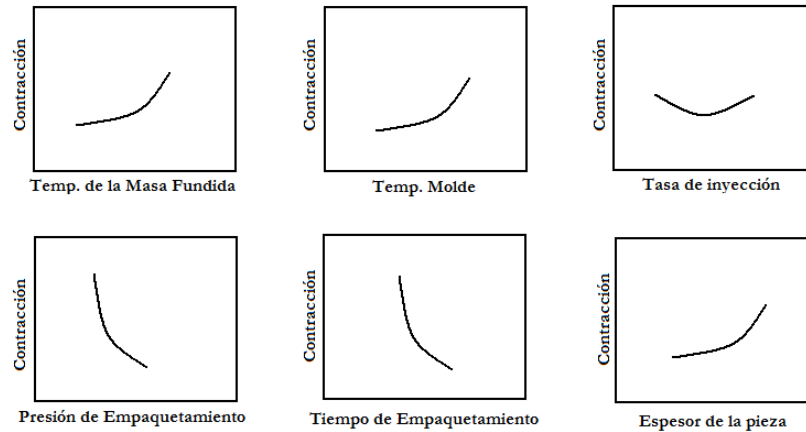


Figura 4.2. Efectos de las condiciones de procesamiento [14].

A continuación, se enlistan las variables que están relacionadas con el defecto pandeo durante el proceso de inyección:

Presión de empaquetamiento

La magnitud de la presión de empaquetamiento, durante el proceso tendrá significantes efectos en la contracción de la pieza, de hecho la contracción no uniforme afecta a la distorsión dimensional y/o pandeo. Alta presión de empaquetamiento ayuda a reducir la contracción global, mientras que la baja presión incrementa la contracción.

Temperatura del molde

Variaciones en la temperatura del molde ocasiona pandeo. Sí la pieza se pandea a causa del enfriamiento insuficiente, será necesario volver a ubicar las líneas de enfriamiento para incrementar el flujo del refrigerante. Diseñar un sistema de enfriamiento no es para mantener la temperatura del molde uniforme, es para lograr un tiempo de enfriamiento uniforme. Sí la temperatura del molde es alta, se presenta uniformidad en la contracción y bajos niveles de orientación, pero requerirá mayor tiempo de enfriamiento [18].

Temperatura de la masa fundida

Incrementar la temperatura de la masa fundida puede disminuir o aumentar la contracción. A muy bajas temperaturas de la masa fundida, se reporta alta contracción, lo que causa que la pieza no pueda ser desmoldeada. Incrementar la temperatura de la masa fundida decrece la contracción por que la viscosidad disminuye y la presión de empaquetamiento puede ser mejor distribuida en la cavidad [18].

Tiempo de enfriamiento

La contracción no uniforme a través del espesor de la pieza, puede ser causada por diferencias en la tasa de enfriamiento entre la cavidad y el corazón. Debido a la complejidad de la pieza y al diseño del molde, es difícil lograr un enfriamiento uniforme en la práctica [1], es decir, el pandeo puede ser causado por la variación de enfriamiento, lo cual es muy común en estructuras largas y en forma de caja [18].

Espesor de la pared

Piezas con secciones de pared gruesa son más difíciles de enfriar y empaquetar, ya que toma mayor tiempo el enfriamiento y presión adicional para empaquetar. Cuando las piezas tienen secciones delgadas y gruesas, es recomendable situar el punto de inyección en la sección gruesa porque permite empaquetar las secciones gruesas si las delgadas ya han sido solidificadas. Los diferentes requerimientos de empaquetamiento y enfriamiento de una sección gruesa y una sección delgada, conducen a que la pieza se contraiga y a que se produzcan esfuerzos internos en la transición de espesores.

Ubicación del punto de inyección

Una forma de evitar la contracción no uniforme es utilizar varios puntos de inyección, de esta forma la longitud de flujo se acorta y la presión en la cavidad tiende a ser más uniforme. La dimensión del punto de inyección no tiene influencia considerable [14], cuando las piezas son delgadas.

Ubicación del sistema de canales de inyección

El diseño de los canales de inyección es uno de los factores críticos en la exactitud dimensional de las partes. La esencia del sistema es evitar problemas asociados con sobre empaquetamiento, causando variación en la contracción. El sistema de canales de inyección debe ser diseñado para el llenado de todas las cavidades al mismo tiempo y para determinar la presión. Cambiando el sistema de canales de inyección altera la caída de la presión de la cavidad a causa del cambio en la tasa de flujo y calor producido por la fricción [18].

4.4.2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

En esta sección se propone el diseño experimental a partir del método Taguchi; así mismo, se definen los factores, las consideraciones de análisis que se tomaron en cuenta durante el proceso de análisis, definición de niveles durante el diseño de experimentos y el arreglo del experimento.

En la figura 4.3 se describe el proceso propuesto utilizando diagramas IDEF0. Las variables que se integran al proceso se denominan variables de entrada y el resultado una variable de salida. El nivel de la variable de salida depende de los niveles que adopten las variables de entrada. El estudio se beneficia al saber qué combinación de variables de entrada produce la variable de salida óptima.

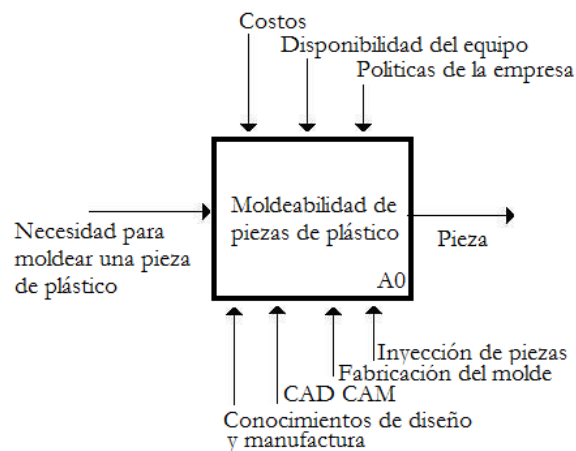


Figura 4.3. Moldeabilidad de piezas de plástico.

Las razones principales por lo que se utilizó el método Taguchi son las siguientes:

- Permite encontrar las condiciones, para lograr un comportamiento óptimo del proceso.
- Permite la investigación de las interacciones de los efectos deseados, basados en el proceso conocido.
- Se cuenta con conocimiento previo acerca del proceso.
- Taguchi brinda dos opciones, utilizar el método completo (utilizando todas y cada una de las diferentes combinaciones entre factores y niveles) y el simplificado (a partir del arreglo predeterminado, se utiliza las combinaciones según el número de factores). Los resultados en las opciones son equivalentes.
- Es un método que se puede realizar sin la necesidad de utilizar algún software especializado y que tiene la opción de elegir los ensayos sobre bases científicas, para detectar los efectos de las variables y cuantificarlas.
- Según el arreglo ortogonal con el que se trabaje, la precisión obtenida en la estimación de los efectos es la máxima posible.
- El método Taguchi es un método que se utiliza a nivel mundial y ha servido para optimizar, corregir y mejorar cualquier tipo de proceso en la industria.

Definición de Factores

En la literatura se identificaron los factores principales que ocasionan el pandeo en piezas de inyección plástica [2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 22]. Se determinaron 6 factores/variables (Tabla 4.2), como se indica a continuación:

- Temperatura del molde (A)
- Temperatura de la masa fundida (B)
- Presión de empaquetamiento (C)

- Tiempo de empaquetamiento (D)
- Tiempo de enfriamiento (E)
- Tiempo de inyección (F)

Consideraciones de análisis

Como parte medular del análisis de moldeabilidad se define la geometría de la pieza, material, canales de enfriamiento, canales de inyección y punto de inyección:

- **Geometría de la pieza**

La pieza es un remate de electrodoméstico de línea blanca, según el criterio preestablecido de pieza larga, tiene una relación largo/ancho de 12.2 (757 mm de largo y 62 mm de ancho). El espesor de la pared es constante: 3mm.

- **Material**

El material a inyectar fue Polipropileno con 40% de fibra de vidrio y 10% de carga mineral.

Canales de enfriamiento

Se asume que los canales de enfriamiento tienen una temperatura constante a lo largo del molde con un diámetro de 12 mm y se utilizó agua como refrigerante (Fig. 4.5).

- **Canales de inyección**

El sistema de canales de inyección (colada fría) incluye el bebedero, con una longitud de 100 mm; los canales de inyección tiene un diámetro de 7mm.

- **Punto de inyección**

En el caso de estudio se tiene predeterminado el tipo del punto de inyección, de tipo submarino, ubicado en el extremo de la pieza.

Definición de Niveles

El nivel del experimento es el rango en que varía cada factor. A cada factor se le asignó tres niveles, como se describen en la tabla 4.2. Para determinar los niveles del experimento se tomó en cuenta las dos siguientes fuentes de análisis:

1. Se realizó un análisis de flujo para determinar la ventana de procesamiento, de donde se obtuvieron los rangos de las variables que definen los niveles de análisis que se utilizaron en el método Taguchi:
 - Tiempo de inyección 1-2 s.
 - Temperatura de la masa fundida del material de 204-260 °C.
 - Temperatura del molde de 37-54 °C se sugiere 50 °C (el nivel de cristalinidad es determinado por la temperatura del molde) (Fig. 4.4).
2. Se consultó las especificaciones técnicas de procesamiento del fabricante para validar la ventana de procesamiento [13].

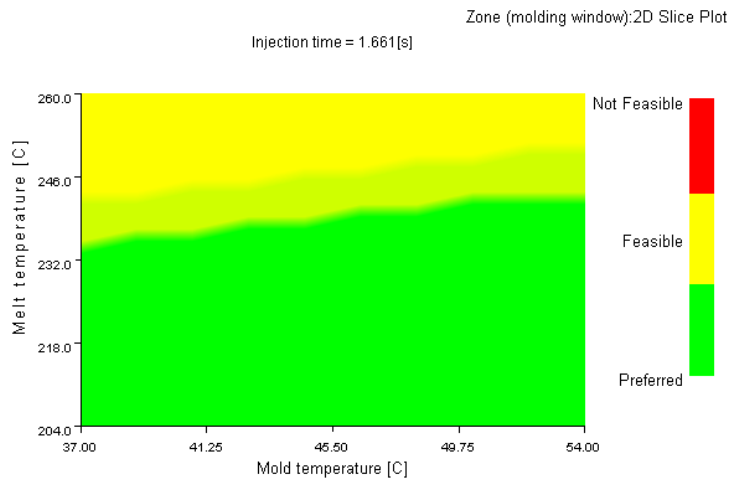


Figura 4.4. Ventana de procesamiento (*Moldflow*).

Definición del arreglo

Taguchi es construido por un conjunto de diseño para experimentos fraccionales que puede cubrir la aplicación. El conjunto de diseños consiste en arreglos ortogonales, que son herramientas que permiten al ingeniero evaluar qué tan robustos son los diseños del proceso y del producto con respecto a los factores de ruido, los cuales ayudan a determinar el número mínimo de experimentos que se requieren para el conjunto de variables o factores que se están utilizando. El arreglo ortogonal proporciona al experimento factorial fraccionaria el número de situaciones y está asociado al número de interacciones entre niveles y factores, es decir, el método es seleccionado a un número de experimentos, los cuales producen la mayor información posible, conocido como experimento factorial parcial.

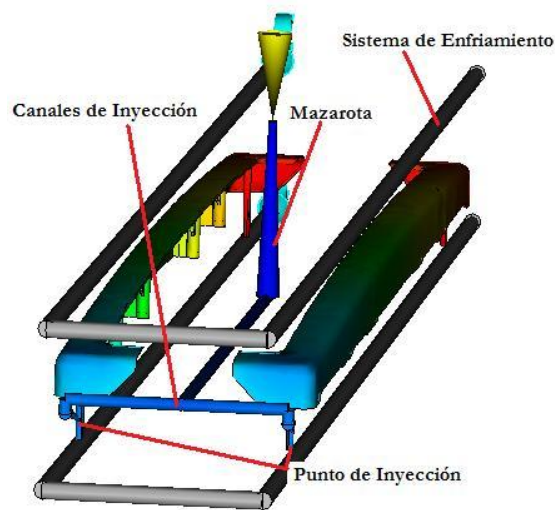


Figura 4.5. Configuración del sistema reológico.

Existe gran variedad de arreglos con diferentes características, según el número factores y niveles que se desean analizar. El arreglo ortogonal tiene una configuración $L_a(b^c)$, donde:

L= Indica que es un arreglo ortogonal.

a=Número de corridas experimentales.

b=Número de niveles para cada factor.

c=Número de columnas o factores de un arreglo ortogonal.

Tabla 4.2. Diseño del experimento. Arreglo L27.

Nivel 3	60	260	80%	9	25	2
Nivel 2	50	240	65%	7	20	1.5
Nivel 1	40	220	50%	5	15	1
F A C T O R E S						
Número de experimento	A	B	C	D	E	F
	Temp. del Molde [C]	Temp. de la Masa Fundida [C]	Presión de Empaquetamiento [MPa]	Tiempo de Empaquetamiento [s]	Tiempo de Enfriamiento [s]	Tiempo de Inyección [s]
1	40	220	50	5	15	1
2	40	220	65	7	20	1.5
3	40	220	80	9	25	2
4	40	230	50	5	20	2
5	40	230	65	7	25	1
6	40	230	80	9	15	1.5
7	40	260	50	5	25	1.5
8	40	260	65	7	15	2
9	40	260	80	9	20	1
10	50	230	50	9	20	1
11	50	230	65	5	25	1.5
12	50	230	80	7	15	2
13	50	260	50	9	25	2
14	50	260	65	5	15	1
15	50	260	80	7	20	1.5
16	50	220	50	9	15	1.5
17	50	220	65	5	20	2
18	50	220	80	7	25	1
19	60	260	50	7	25	1
20	60	260	65	9	15	1.5
21	60	260	80	5	20	2
22	60	220	50	7	15	2
23	60	220	65	9	20	1
24	60	220	80	5	25	1.5
25	60	230	50	7	20	1.5
26	60	230	65	9	25	2
27	60	230	80	5	15	1

Para el caso experimental se requiere un arreglo que incluya 6 factores a tres niveles cada uno, es decir, se utilizó un arreglo L27 (3^6) (Tabla 4.2), donde $c=13$ puede variar de 1 a 13 (Apéndice tabla A).

Para conocer el resultado del diseño de experimentos, se llevo a cabo las 27 simulaciones, que incluyen las diferentes combinaciones de factores y niveles que muestra el arreglo del diseño del experimento L27.

Proceso de simulación de análisis de flujo

Se realizo un análisis *Fill+Cool+Fill+Pack+Warp*, utilizando *Autodesk Moldflow Insight 2010* para análisis de flujo. Esta secuencia de análisis puede ser usado para predecir el flujo del polímero dentro del molde durante la fase de llenado, seguido de un análisis de empaquetamiento, enfriamiento y pandeo de la pieza en las diferentes direcciones (Figura 4.6).

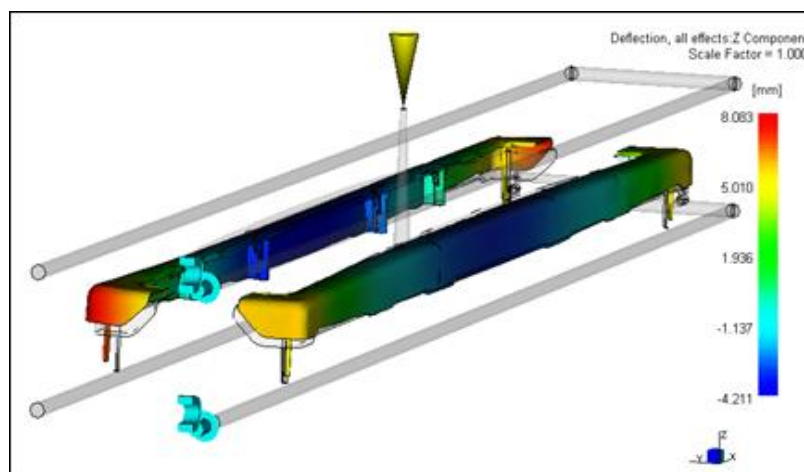


Figura 4.6. Simulación.

Son diversas las razones por las cuales se utiliza un análisis de flujo: mejorar la calidad de las piezas, acelerar el progreso del proyecto y reducir el número de pruebas del molde. Para este trabajo, el análisis de flujo fue indispensable para realizar las 27 simulaciones, bajo las diferentes condiciones de procesamiento que afectan el pandeo, así como verificar los parámetros óptimos y el diseño de la pieza.

El tiempo de procesamiento (CPU) de cada simulación fue de entre 120 y 160 minutos, es decir, el tiempo total de simulación fue de 70 horas aproximadamente, para 27 simulaciones.

Para llevar a cabo las simulaciones preestablecidas en el diseño de experimentos, fue necesario realizar las siguientes actividades:

- Importación o creación del modelo CAD (Fig. 4.7).

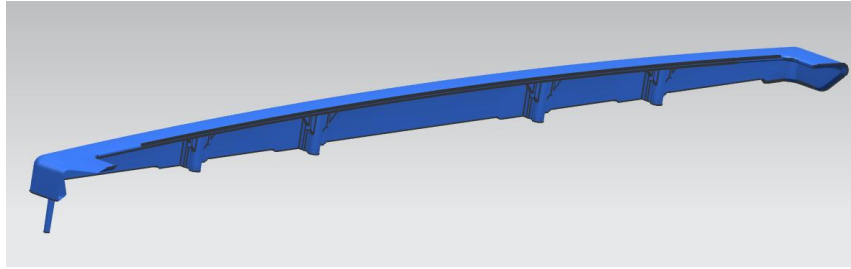


Figura 4.7. Modelo CAD. UGNX 7.5.

- Realización del mallado de la pieza, se utilizó 11,484 elementos tetraédricos (Fig. 4.8).

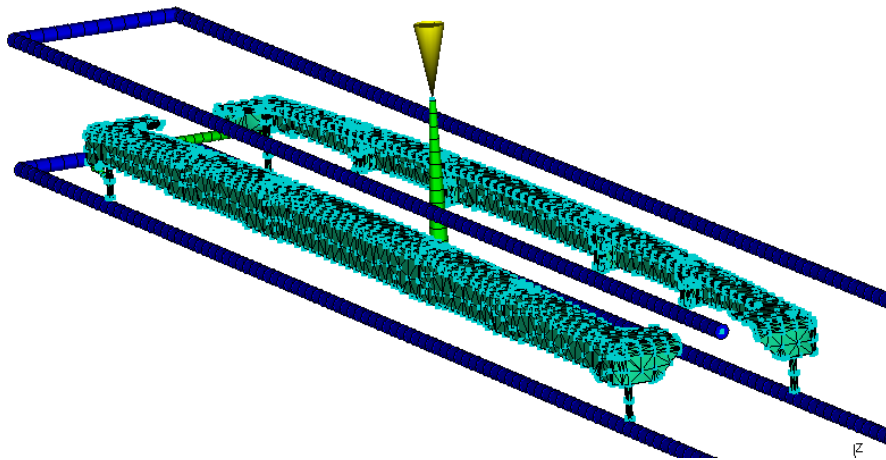


Figura 4.8. Mallado de la pieza.

- Definición del tipo de análisis (Fig. 4.9).
- Selección del material (Fig. 4.9).








✓  Part (pza-large-2ptoinyeccion.stl)	Modelo CAD importado en STL
✓  Dual-Domain Mesh (11484 elements)	Mallado
✓  Fill + Cool + Fill + Pack + Warp	Tipo de análisis
✓  APP 40GS 3840WH: Ferro	Definición de material
✓  1 Injection Location(s)	Punto de inyección
✓  2 Cooling Circuit(s)	Sistema de enfriamiento
✓  Process Settings (User)	Parámetros del proceso

Figura 4.9. Selección de parámetros.

- Selección del punto de inyección (Fig. 4.10).

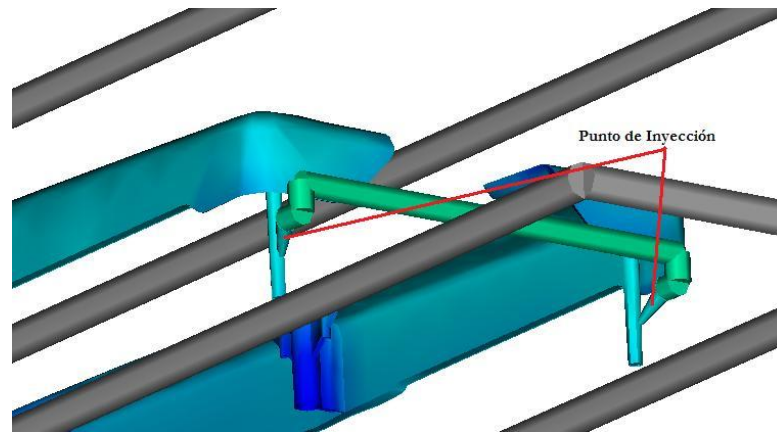


Figura 4.10. Punto de Inyección.

- Diseño de canales de inyección (Fig. 4.11).

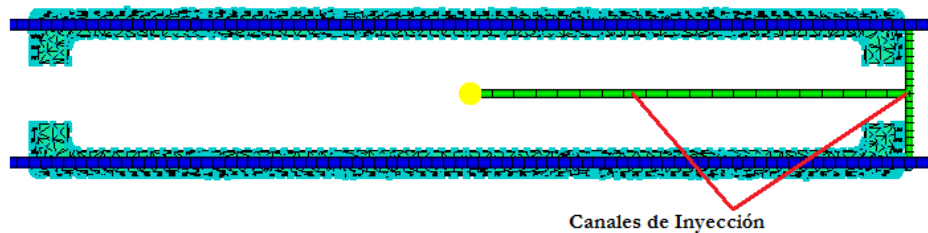


Figura 4.11. Canales de Inyección.

- Diseño del sistema de enfriamiento (Fig. 4.12).

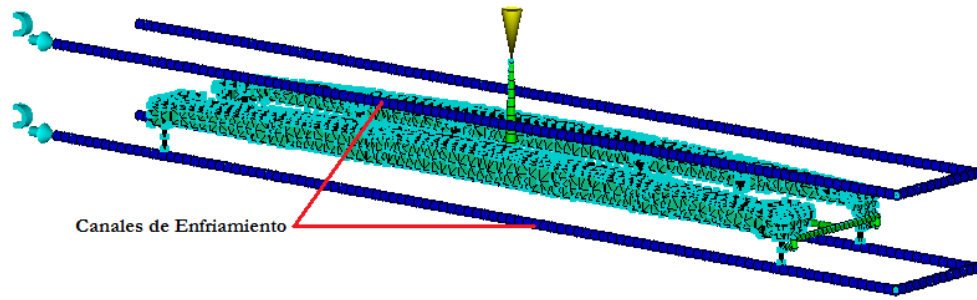


Figura 4.12. Canales de Enfriamiento.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de resultados que se obtuvieron a partir de las 27 simulaciones propuestas en el diseño del experimento. Para el análisis de resultados, se obtuvo la relación S/N y el análisis ANOVA para identificar la tendencia del pandeo de la pieza. Así mismo, se obtuvieron las gráficas de pandeo de cada perfil en estudio y la gráfica de los efectos de los factores.

5.2. PUNTOS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS DE PANDEO

Para la obtención de los resultados y dado que el pandeo está asociado al cambio de la geometría, se propone como métrica la deflexión en la dirección Z. Se establecieron 4 puntos A, B, C y D, considerando que la pieza es simétrica y se obtuvo el promedio de la deflexión a lo largo de la pieza (Fig. 5.1).

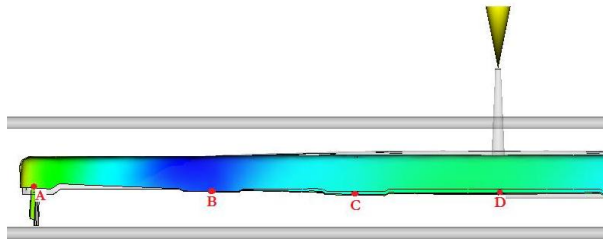


Figura 5.1. Puntos de análisis.

En la tabla 3 se presentan los resultados del promedio del pandeo, así como la tasa de S/N de cada experimento, donde la combinación óptima de los niveles de cada factor, es la que presenta la mayor tasa de S/N (Ecuación 1, sección 3.4). El mínimo pandeo se presentó en el experimento 9 y 21 con deflexiones promedio de 2.72 y 2.79 mm, respectivamente.

Cabe mencionar que los experimentos 9 y 21 tienen en común el nivel 3, en el caso de temperatura de la masa fundida de 260 °C y presión de empaquetamiento de 80% la presión de inyección, y nivel 2 para tiempo de enfriamiento de 20 segundos, en la figura 5.2 se muestra el resultado del pandeo de las 27 simulaciones.

Tabla 5.1. Resultados de pandeo y S/N

Número de experimento	Pandeo Promedio (mm)	S/N
1	4.2726	-12.613
2	3.51645	-10.922
3	2.93965	-9.3659
4	3.75825	-11.499
5	3.340725	-10.476
6	2.900775	-9.2502
7	3.735675	-11.447
8	3.218975	-10.154
9	2.72925	-8.7208
10	3.64375	-11.230
11	3.50945	-10.904
12	3.3147	-10.4088
13	3.457425	-10.7750
14	3.7513	-11.4836
15	2.9959	-9.5305
16	4.01075	-12.064
17	3.506525	-10.897
18	3.557925	-11.023
19	3.49715	-10.874
20	3.241625	-10.215
21	2.7922	-8.9189
22	3.89665	-11.813
23	3.568725	-11.050
24	3.12475	-9.8963
25	3.584625	-11.088
26	3.37375	-10.562
27	3.681125	-11.319

En la figura 5.3 se muestra el efecto de los diferentes niveles de cada factor. La presión de empaquetamiento tiene mayor impacto en el proceso, se observa que existe mayor pandeo cuando la presión de empaquetamiento es baja, es decir, factor C-nivel 1. Contrario a lo anterior, se puede observar que el pandeo mínimo se presenta a un nivel 3 de presión de empaquetamiento, factor C-nivel 3.

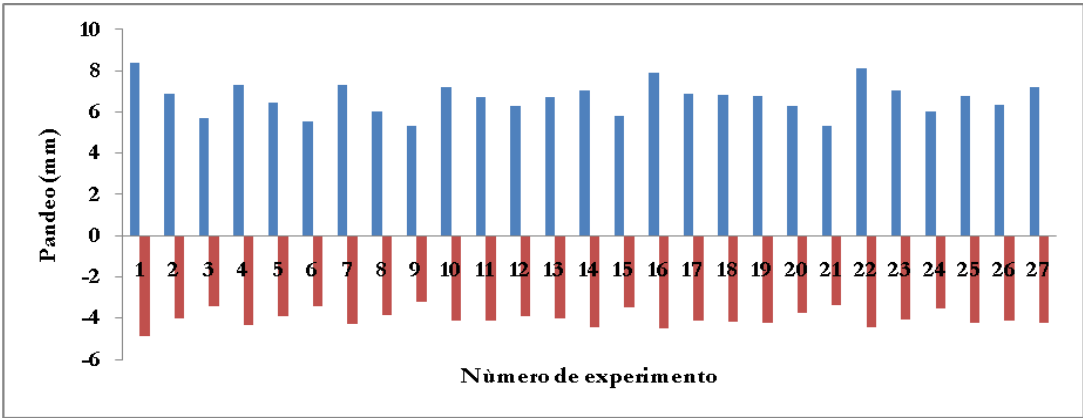


Figura 5.2. Resultados de Pandeo.

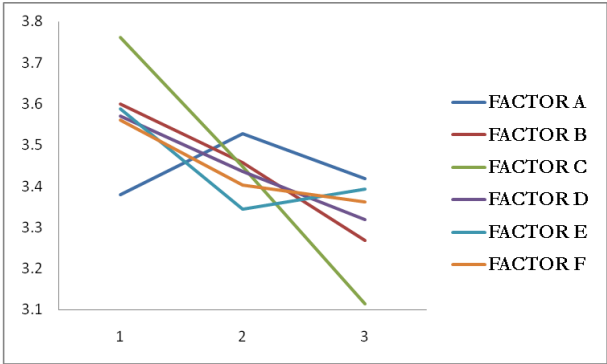


Figura 5.3. Efecto en los factores

5.3. RESULTADOS DE ANOVA

Se analizó la tendencia del pandeo utilizando ANOVA para determinar la magnitud relativa del efecto de cada factor y estimar el error de varianza.

La tabla 5.2 indica los resultados de ANOVA, donde la presión de empaquetamiento tiene mayor influencia en el pandeo, 52.8%; la temperatura de la masa fundida tiene una influencia

del 13.78% y el tiempo de enfriamiento y tiempo de empaquetamiento tienen un peso de 8.01 y 8.39%, respectivamente. Las variables que no tienen impacto significativo en el análisis son la temperatura del molde y el tiempo de inyección con 3 y 5.5% respectivamente. El error de varianza se estima en 8.3%, lo cual se considera aceptable.

Tabla 5.2. ANOVA

Factor	S	F	V= SA/fA	P	S'	%
A	0.106626	2	0.05331	0.032644	0.106627	2.992
B	0.494518	2	0.24725	0.151402	0.494518	13.877
C	1.882673	2	0.94133	0.576400	1.882673	52.832
D	0.285732	2	0.14286	0.08748	0.285732	8.018
E	0.298974	2	0.14948	0.091534	0.298974	8.390
F	0.197732	2	0.09886	0.060537	0.197732	5.548
Total	3.266258	12	0.02122	0.090989		
e	0.297194	14			0.29719	8.340

6. CONCLUSIONES

A partir de la literatura y el proceso de realización de este trabajo, concluyo que la moldeabilidad es un mecanismo que proporciona información para predecir la calidad de la pieza y evaluar la factibilidad de ser fabricada por medio del proceso de inyección. El beneficio de evaluar la moldeabilidad, es evitar tomar decisiones incorrectas durante la fabricación del producto y/o minimizar realizar ajustes a pie de máquina.

El objetivo propuesto en el trabajo se cumplió, ya que se propuso una metodología de análisis de moldeabilidad de piezas plásticas, se probó con un caso de estudio, del cual se obtuvieron medidas cuantitativas de la calidad de la pieza, a partir de los parámetros que intervienen en el proceso. La metodología propuesta, propone el pandeo como criterio de evaluación, ya que es un defecto común en las piezas plásticas largas y se puede cuantificar con la deflexión de la pieza, así mismo, se logró contrarrestar los efectos del pandeo, identificando el rango de las variables que ocasionan el defecto.

Respecto a la caracterización de piezas plásticas largas de electrodomésticos, se propone un criterio de caracterización, el cual establece como métrica la relación largo/ancho, donde el valor mínimo para considerar una pieza larga es 7 y que cuente con un punto de inyección.

Con respecto al caso de estudio, se concluye que a partir de la metodología propuesta de evaluación de moldeabilidad para piezas largas, se determinó las condiciones óptimas de moldeo, se obtuvo la combinación de factores y niveles con la máxima relación S/N que aumentan la calidad de la pieza y que minimizan el defecto pandeo durante el proceso de inyección: temperatura del molde 40 °C, temperatura de la masa fundida 260 °C, presión de empaquetamiento 80 % la presión de inyección, tiempo de empaquetamiento 9 s, tiempo de enfriamiento 20 s y tiempo de inyección 20 s.

Se observa que a bajas presiones de empaquetamiento hay un aumento de hasta un 45% en el pandeo de la pieza, también que la presión y tiempo de empaquetamiento, temperatura de la masa fundida y tiempo de inyección son inversamente proporcionales a la tendencia del pandeo. A partir del análisis de varianza, la magnitud del efecto de los parámetros es la siguiente: la presión de empaquetamiento presenta el mayor efecto en la calidad de la pieza 52

%, seguida de la temperatura de la masa fundida 13.87 % y del tiempo de empaquetamiento y tiempo de enfriamiento 8 y 8.3%, respectivamente. Cabe mencionar que la temperatura del molde y el tiempo de inyección presentan un impacto menor en comparación a los factores restantes. El error de varianza se atribuye a la posible falta de algún factor o alguna interacción entre factores durante el análisis.

Respecto al método Taguchi, se concluye que es conveniente utilizarlo por las siguientes dos razones: muestra la tendencia del efecto del factor que se desea analizar y tiene la opción del arreglo ortogonal, reduciendo notablemente el número de experimentos.

7. APÉNDICE

Tabla A. Arreglo ortogonal L27 [8].

<i>Número de experimento</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>X4</i>	<i>X5</i>	<i>X6</i>	<i>X7</i>	<i>X8</i>	<i>X9</i>	<i>X10</i>	<i>X11</i>	<i>X12</i>	<i>X13</i>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

8. REFERENCIAS

- [1] Flores G. Ramón, Ayala R. Álvaro y Cruz M. Miguel A, “Evaluación de la relación Geometría-Rigidez en piezas de material plástico”, *Memorias del XIV Congreso Internacional de la SOMIM*, México 2008.
- [2] Babur Ozcelik, Alder Ozbay. “Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding”. *Int. Commun. Heat Mass Transf*, (2010).
- [3] Yin, Z.P, Han, X.L, “Geometric mouldability analysis by geometric reasoning and fuzzy decision making”, *Comput. Aided Design* 36,37-50, 2004.
- [4] Gordillo A. y Ariza D. Sánchez-Soto. “Shrinkage predictions of injection moulded parts in semi-crystalline polymers: Experimental verification”. *Centro Catalá del Plástico*. Barcelona.
- [5] Malloy Robert A, *Plastic Part Design for Injection Molding*. Hanser Publishers, Munich. 1994.
- [6] Ming-Chih Huang, Ching-Chih Tai, “The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature”, *Journal of Materials Processing Technology* 110 (2001) 1-9, 1999.
- [7]. Ching-Piao Chen, Ming-Tsan Chuang, Yun-Hsiang Hsiao, “Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis”, *Expert Systems with Applications* 36 (2009) 10752-10759.
- [8] Ranjit K. Roy, *A primer on the Taguchi Method*, Edit. Van Nostrand Reinhold, New York 1990.
- [9] Fei Yin, Huajie Mao, “Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding”, *Materials and Design* 32 (2011) 1844-1850, 2010.
- [10] Jin Cheng, Yixiong Feng, Jianrong Tan, Wei Wei, “Optimization of injection mold based on fuzzy moldability evaluation”, *Journal of Materials Processing Technology* 208 (2008) 222-228, 2007.

- [11] Babur Ozcelik y T. Erzurumlu, “Comparasion of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm”, *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 437-445 , 2005.
- [12] Chiang, K.T, “The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin Shell feature using grey-fuzzy logic: a case study on machining the PC/ABS cell phone shell”. *Mater. Design* 28, 1851-1860, 2007.
- [13] FERRO, “Technical Molding Sheet”, GAPEX APP10-APP40
- [14] Shoemaker Jay, *Moldflow Design Guide*, Edit. Hanser. Massachusetts USA, 2006.
- [15] Vagelatos, G.A Rigatos, G.G, Tzafestas, S.G “Incremental Fuzzy supervisory controller design for optimizing the injection molding process”, *Expert Syst. Appl.* 20,207-216, 2001.
- [16] Ahmed Al-Asheeb y A. Molina,”Internet-based Collaborative Design for an Injection-Mouñding System”, *Concurrent Engineering: Resarch and Applications*, 1063-293X/03/04 0289-11, 2002.
- [17] A. Molina y R. Bell, “Reference models for the computer aided support of simultaneous engineering”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 15 No. 3, 193-213, 1994.
- [18] Kwai-Sang Chin y T.N. Wong, “Knowledge-based Evaluation for the Conceptual Design Development of Injection Molding Parts”, *Engng Applic Artif Intell*, Vol. 9, No. 4, pp 359-376, 1996.
- [19] Ayala Ruiz Álvaro y Borja R. Vicente. “Modelos de información en el diseño para manufactura”. UNAM. 2006
- [20] Morano Okuno, Hector R. *Diseño de moldes de inyección asistido por modelos de información*. Facultad de Ingeniería UNAM. Mexico 2001.
- [21] Cruz Miguel A. y Trejo Adalberto, “Gas-Assisted injection molding of high gloss large parts”, *Memorias del XVI Congreso Internacional de la SOMIM*. 2010 Monterrey Nuevo León, México.

- [22] Babur Ozcelik, Ibrahim Sonat, "Warping and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding". *Materials and Design* 30 (2009)367-375, 2007.
- [23] Tim A. Osswald, Menges Georg, *Materials Science of Polymers for Engineers*. Hanser Publisher: Munich, Viena y New York. 1996.
- [24] Kramer S. Alexander, *Avances y tendencias durante el procesamiento por inyección de plásticos*, Avance Industrial S.A. 2002.
- [25] Krishnamachari S.I. *Applied stress analysis of plastics*. Ed. Van Nostrand Reinhold. Nueva York 1993
- [26] Savgorodny. *Transformación de plásticos*. Ed Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1978
- [27] Yacuzzi Enrique, Martín Fernando, et.al. *El diseño experimental y los métodos de Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica*.
<http://www.cema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/258.pdf>
- [28] Mock, J., *Plastic Engineering*. 1983.
- [29] W. Hines William, Montgomery Douglas, Goldsam David y Borrer Connie. Probabilidad y estadística para ingeniería. Cuarta edición. Edit CECSA. México 2005