

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Diseño y prototipado de una pieza plástica que contenga defectos  
visibles después del moldeo por inyección"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Paolo Andrés Peralta Barriga

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por sus bendiciones que me permitieron llegar a este día.

A mi madre por su infinito amor, paciencia y apoyo en cada etapa de mi vida. A mi familia por siempre tener confianza en mí y por su apoyo incondicional.

A mi novia por su apoyo y paciencia en la culminación de mi carrera universitaria.

Al Ing. Juan José Gallardo y PhD. Andrés Rigáil por su contribución durante el desarrollo de este trabajo.

**Paolo Peralta**

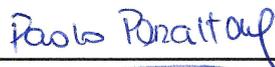
## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Paolo Andrés Peralta Barriga

Andrés Francisco Rigail Cedeño, Ph.D.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



---

Paolo Peralta Barriga  
AUTOR



---

Andrés Rigail Cedeño, Ph.D.  
TUTOR

## RESUMEN

La producción de piezas obtenidas por moldeo por inyección no se encuentra bien tecnificada en el Ecuador. Esta falta de tecnificación tiene como resultado la presencia de defectos en las piezas plásticas lo que no permite que exista un volumen elevado de exportaciones de esta clase de productos en comparación con países con un tamaño de mercado similar al del Ecuador. Alrededor del 65% de las exportaciones en el Ecuador están basadas en láminas y películas de polipropileno, mientras que la exportación de productos obtenidos por inyección de plásticos representa solo el 6% del volumen total de exportaciones.

El presente trabajo tiene como objetivo general el diseño y prototipado de una pieza que ilustre los principales defectos obtenidos en el proceso de moldeo por inyección, así como también la inclusión de consideraciones de diseño para evitar estos defectos. Entre otros objetivos se encuentra la validación de los defectos a través de simulación computarizada y realizar el prototipado a través de impresión 3D. La metodología de diseño del modelo se dividió en tres etapas. La primera etapa consistió en realizar una búsqueda sistemática de los principales defectos del proceso de moldeo por inyección, así como las consideraciones de diseño que sirvan como guía para diseñadores y fabricantes de piezas plásticas. La segunda etapa consistió en el modelado de la pieza, selección de material y la obtención de la caída de presión, fuerza de cierre y contracción volumétrica del modelo de manera analítica. Finalmente, la última etapa consistió en la validación de los defectos esperados a través de simulación computarizada y posterior prototipado por impresión 3D.

Los resultados arrojados por la simulación se compararon con los resultados obtenidos de manera analítica. La caída de presión del modelo obtuvo un error del 7.06%, la contracción volumétrica obtuvo un error del 10.55% y finalmente el error de la fuerza de cierre durante la etapa de empaquetamiento fue de 44.84%. Por otra parte, los defectos y las mejoras de diseño que fueron incluidos en el modelo fueron validadas a través de la simulación, donde se obtuvieron los resultados esperados. Finalmente, luego de la validación de todos los defectos se procedió a realizar el prototipado del modelo a través de impresión 3D con filamento PLA.

Palabras Claves: plásticos, polipropileno, inyección, defectos, impresión 3D.

## **ABSTRACT**

*The production of pieces by injection molding is not well technified in Ecuador. This lack of development results in the presence of defects in plastic parts that do not allow a high volume of exportation of this kind of products compared to countries with a similar market size. Around 65% of exports in Ecuador are based on polypropylene sheets and films, while the export of injection molding products it is about 6% of the total volume of exports.*

*The general objective of this work is the design and prototype of a part that illustrates the main defects in the injection molding process, as well as the inclusion of design guidelines to avoid these defects. The other objectives are the validation of the defects through computer simulation and prototyping through 3D printing.*

*The design methodology of the model was divided into three stages. The first stage consisted of carrying out a systematic search for the main defects of the injection molding process and the design guidelines for designers and manufacturers of plastic parts. The second stage consisted of modeling the piece, selecting the material, and obtaining the pressure drop through the part, the clamp force and volumetric shrinkage of the model in an analytical manner. Finally, the last stage consists of the validation of the expected defects through computer simulation and subsequent prototyping by 3D printing.*

*The results of the simulation are compared with the results obtained analytically. The pressure drop of the model obtained an error of 7.06%, the volumetric shrinkage obtained an error of 10.55% and finally the error of the clamp force during the packing stage was 44.84%. On the other hand, the defects and design improvements that were included in the model were validated through the simulation, where the expected results were obtained. Finally, after the validation of all the defects, the prototype of the model was obtained through 3D printing with PLA filament.*

*Keywords: plastics, polypropylene, injection, defects, 3D printing.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS .....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Descripción del problema .....	1
1.2    Objetivos .....	2
1.2.1    Objetivo General .....	2
1.2.2    Objetivos Específicos .....	2
1.3    Marco teórico.....	3
1.3.1    Consideraciones de llenado de molde.....	4
1.3.2    Líneas de soldadura.....	15
1.3.3    Contracción y pandeo .....	22
1.3.4    Sugerencias de diseño.....	31
CAPÍTULO 2 .....	37
2.    Metodología .....	37
2.1    Factores de influencia.....	38
2.2    Alternativas Propuestas.....	38
2.2.1    Propuesta de diseño de la pieza .....	39

2.2.2	Propuestas de la geometría de la pieza .....	40
2.3	Selección de la Mejor Alternativa.....	41
2.4	Diseño de forma .....	44
2.4.1	Descripción de los errores mostrados en la pieza .....	44
2.5	Selección de material .....	48
2.6	Diseño detallado.....	51
2.6.1	Caída de presión en la pieza.....	52
2.6.2	Determinación de fuerza de cierre .....	55
2.6.3	Contracción volumétrica de la pieza.....	55
2.6.4	Contracción isotrópica lineal .....	60
2.6.5	Diseño de la entrada a la cavidad del molde .....	61
CAPÍTULO 3 .....		65
3.	Resultados.....	65
3.1	Método de Elementos Finitos .....	65
3.2	Análisis de Resultados .....	67
3.2.1	Ubicación del punto de inyección .....	67
3.2.2	Tiempo de Llenado .....	68
3.2.3	Caída de presión.....	69
3.2.4	Temperatura promedio.....	71
3.2.5	Confianza de llenado .....	73
3.2.6	Trampas de aire .....	74
3.2.7	Líneas de soldadura.....	74
3.2.8	Estimación de marcas de hundimiento o rechupes .....	76
3.2.9	Contracción volumétrica en la eyección .....	78
3.2.10	Guías de flujo.....	81
3.2.11	Pandeo total.....	82

3.3	Comparación de resultados .....	83
CAPÍTULO 4 .....		87
4.	Discusión y Conclusiones .....	87
4.1	Conclusiones .....	87
4.2	Recomendaciones .....	88
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
PP	Polypropylene
PE	Polyethylene
HDPE	High Density Polyethylene
PLA	Polylactic Acid
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
MIP	Ministerio de Industrias y Productividad
TPE	Thermoplastic elastomers
SAN	Styrene Acrylonitrile
PPS	Polyphenylene sulfide
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
FEA	Finite Elements Analysis

## SIMBOLOGÍA

m	Metros
mm	Milímetros
Pa	Pascal
MPa	Mega pascal
GPa	Giga pascal
g	Gramo
Kg	Kilogramo
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetro cúbico
°C	Grados centígrados
J/m	Joule por metro
$\Delta P$	Variación de presión
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
s	Contracción lineal
$r_v$	Relación de volúmenes específicos
k	Viscosidad de Ley de Poder
$T_{melt}$	Temperatura del fundido
$T_{wall}$	Temperatura de la pared del molde
$A_{trans}$	Área transversal
n	Índice de Ley de Poder
R	Radio
L	Longitud
$\dot{V}$	Flujo volumétrico
$\bar{v}$	Velocidad media del fundido
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte
W	Vatios
$\Delta P_F$	Caída de presión en las caras
$\Delta P_H$	Caída de presión en las bisagras

$F_{\text{clamp}}$	Fuerza de cierre
$P_{\text{clamp}}$	Presión a la fuerza de cierre
$T_t$	Temperatura de transición
$D$	Diámetro
$v_0$	Volumen específico de referencia
$b_{1,m}$	Coeficiente de estado líquido
$b_{2,m}$	Coeficiente de estado líquido
$b_5$	Temperatura de transición a presión cero
$b_6$	Tasa de cambio de la temperatura de transición con respecto a la presión
$b_{3,m}$	Coeficiente de estado líquido
$b_{4,m}$	Coeficiente de estado líquido
$b_{1,s}$	Coeficiente de estado sólido
$b_{2,s}$	Coeficiente de estado sólido
$B$	Compresibilidad del material
$T_{\text{no\_flow}}$	Temperatura de flujo estacionario
$T_{\text{end\_use}}$	Temperatura final de uso
$P_{\text{pack}}$	Presión de empaquetamiento
$P_{\text{end\_use}}$	Presión final de uso
$\Delta v$	Variación del volumen específico

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Alternativas de ubicación de entrada a la cavidad del molde. ....	5
Figura 1.2. Alternativas de entrada al molde para pieza en forma de anillo .....	6
Figura 1.3. Perfil de velocidad laminar pseudoplástico. ....	7
Figura 1.4 Consideraciones de diseño de esquinas en piezas plásticas.....	8
Figura 1.5 Caídas de presión a la entrada de la máquina, sistema de alimentación y molde .....	10
Figura 1.6 Patrón de flujo radial durante llenado del molde .....	10
Figura 1.7 Patrones de flujo con dos y tres entradas en molde rectangular.....	11
Figura 1.8 Diferentes patrones de flujo con y sin el uso de guías .....	12
Figura 1.9 Pieza plástica con espesores de pared variable .....	13
Figura 1.10 Alternativas de ubicación de la entrada al molde en pieza con espesor de pared variable.....	14
Figura 1.11 Frente del flujo de pieza con rociado y pieza con frente de flujo uniforme.....	15
Figura 1.12 Efecto de la ubicación de la entrada sobre la longitud del flujo .....	17
Figura 1.13 Difusión molecular en el plano de soldadura .....	18
Figura 1.14 Enlaces en la sección transversal del plano de soldadura .....	19
Figura 1.15 Origen de las líneas de soldadura .....	19
Figura 1.16 Tipos de línea de soldadura.....	20
Figura 1.17 Diseño de transiciones para cambios de espesor.....	23
Figura 1.18 Diseño de refuerzos para evitar contracción y porosidades .....	24
Figura 1.19 Alternativas para ocultar el rechupe en piezas plásticas .....	25
Figura 1.20 Enfriamiento diferencial de una pieza .....	26
Figura 1.21 Pandeo producido por el enfriamiento diferencial .....	27
Figura 1.22 Distorsión dimensional debido a presión diferencial.....	28
Figura 1.23 Pandeo en forma de silla de montar .....	29
Figura 1.24 Comportamiento general de polímero semicristalino de acuerdo con el espesor de pared.....	30
Figura 1.25 Diseño efectivo de refuerzos .....	31

Figura 1.26 Diseño efectivo de esquinas .....	34
Figura 2.1 Metodología de diseño utilizada en el problema .....	37
Figura 2.2 Vista frontal de la pieza desarmada.....	44
Figura 2.3 Diseño del bebedero.....	61
Figura 3.1 Ubicación del punto de inyección en el modelo .....	68
Figura 3.2 Tiempo de llenado del modelo.....	69
Figura 3.3 Caída de presión en el modelo .....	70
Figura 3.4 Caída de presión en la sección de cambio de espesor .....	71
Figura 3.5 Temperatura promedio en el modelo .....	72
Figura 3.6 Temperatura promedio en la sección de cambio de espesor .....	72
Figura 3.7 Confianza de llenado del modelo.....	73
Figura 3.8 Trampas de aire presentes en el modelo.....	74
Figura 3.9 Líneas de soldadura en el modelo.....	75
Figura 3.10 Líneas de soldadura en la cara destinada a presentar este defecto .....	76
Figura 3.11 Rechupe en la cara posterior del modelo.....	77
Figura 3.12 Profundidad del rechupe en según espesor de protuberancia .....	78
Figura 3.13 Contracción volumétrica del modelo, vista frontal.....	79
Figura 3.14 Contracción volumétrica del modelo, vista frontal .....	79
Figura 3.15 Efecto de remoción del núcleo en sección gruesa en la contracción volumétrica .....	80
Figura 3.16 Patrón de flujo sin guías de flujo .....	81
Figura 3.17 Patrón de flujo con guías de flujo.....	82
Figura 3.18 Pandeo en el modelo debido a enfriamiento diferencial.....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Variables que influyen la caída de presión .....	9
Tabla 1.2 Esfuerzos de flexión para distintos materiales .....	21
Tabla 2.1 Matriz de decisiones – Selección de alternativa de diseño .....	42
Tabla 2.2 Matriz de decisiones – Selección de forma geométrica.....	43
Tabla 2.3 Matriz de decisiones – Selección del material de fabricación.....	49
Tabla 2.4 Propiedades mecánicas del Polipropileno CP 141 .....	50
Tabla 2.5 Propiedades de operación del polipropileno .....	51

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Plano general de la pieza
- PLANO 2 Plano detallado de la pieza

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

A nivel mundial, la producción total de plásticos ha incrementado su volumen durante los últimos 50 años. Desde 204 millones de toneladas en 2002, hasta llegar a 299 millones de toneladas en 2013 existió un incremento del 50%. Para el año 2020, se estima que se superarán los 500 millones de toneladas anuales de producción. China es el principal productor de plásticos seguido por Europa, América del Norte y Asia. (Greenpeace, 2018)

En el Ecuador existen varios productores de piezas plásticas que utilizan el proceso de moldeo por inyección. El consumo anual per cápita de plástico en el Ecuador es de 20 kg por persona, por debajo de los 50 kg que alcanza en América Latina. Esta es una información que forma parte de una industria que genera alrededor de 15000 empleos directos en el país. (Revista Líderes, 2015)

En la actualidad, existen varias de las empresas nacionales que tienen hasta 9 certificados de calidad, incluidas ambientales, como la norma 1800 de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés). Un porcentaje del plástico producido en el Ecuador (65%) sale de manera indirecta como envases o empaques de otros productos de exportación, como banano, flores, camarón, entre otros. (Ministerio de Industrias y Productividad, 2015).

La falta de tecnificación en el proceso de diseño y construcción de moldes no permite la producción y exportación de piezas plásticas más sofisticadas que puedan ser utilizadas en sistemas complejos o donde se requiera una alta calidad y fiabilidad de la pieza tales como partes de automóviles, computadores portátiles, impresoras, envases cosméticos, entre otras piezas de uso más avanzado. Esto es una desventaja competitiva para el Ecuador con respecto a las exportaciones que se podría tener a regiones como Centroamérica y el Caribe, cuyos países tienen un desarrollo industrial que es menor al del Ecuador.

Los problemas relacionados con una calidad deficiente de los productos obtenidos por inyección, tales como, líneas de soldadura, rechupes, rebabas, entre otros, son de gran importancia en la productividad de las empresas. Una reducción en la productividad de piezas plásticas por problemas de calidad tiene como consecuencia pérdidas de tiempo y dinero.

Para solucionar este problema, se propone realizar una pieza ilustrativa y didáctica que contenga los errores más comunes obtenidos por moldeo por inyección, la cual servirá como guía de diseño para desarrolladores de moldes y piezas plásticas para mejorar sus procesos y calidad de sus piezas, lo que evitará rechazos de lotes por problemas de calidad e incrementará las exportaciones de estos productos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar una pieza plástica maestra que contenga los principales errores obtenidos durante el proceso de moldeo por inyección.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir un prototipo que contenga la mayor cantidad de defectos posibles, que puedan ser rápidamente identificados de manera visual al moldear la pieza.
- Realizar una búsqueda sistemática de los errores más comunes de diseño de piezas plásticas obtenidas mediante moldeo por inyección.
- Realizar una simulación de llenado para validar la obtención de los defectos esperados.
- Analizar las soluciones a los errores obtenidos en el diseño de piezas plásticas obtenidas mediante moldeo por inyección.
- Presentar planos ilustrativos del prototipo.

### 1.3 Marco teórico

El moldeo por inyección es un proceso industrial que consiste en calentar un polímero hasta que alcanza su punto de fusión y se le fuerza a que fluya a alta presión hacia la cavidad de un molde, donde luego se solidifica. Luego de esto, la pieza moldeada, se retira de la cavidad. (Groover, 2007)

A través del proceso de inyección de plásticos, es posible obtener diversas formas complejas e intrincadas. Con este proceso se pueden fabricar piezas muy pequeñas como piezas muy grandes utilizando casi cualquier tipo de material plástico. Los termoplásticos son los polímeros que más se utilizan en el proceso de moldeo por inyección de plásticos.

El moldeo por inyección es un proceso complejo que involucra una serie de pasos o etapas secuenciales. Las diferentes fases del proceso de moldeo por inyección incluyen el llenado del molde, la fase de empaquetamiento, la fase de sostenimiento, la fase de enfriamiento y la eyección.

**Llenado del molde:** Luego de que el molde se cierra, el material derretido fluye desde la unidad de inyección hacia el molde a través del bebedero y luego a la cavidad.

**Empaquetamiento:** El fundido es presurizado y compactado para asegurar que el molde se llene por completo y suceda una replicación detallada de la superficie. Durante esta etapa se inyecta material adicional en la cavidad para compensar la contracción volumétrica del material.

**Mantenimiento:** El fundido se mantiene en el molde bajo presión para compensar la contracción mientras la pieza se enfría. La presión de holding es usualmente aplicada hasta que la entrada a la cavidad del molde se solidifica.

**Enfriamiento:** El fundido continúa enfriándose y contrayéndose sin compensación.

**Eyección de la pieza:** El molde se abre y la pieza es expulsada de la cavidad utilizando en la mayoría de los casos un sistema mecánico de eyección.

### 1.3.1 Consideraciones de llenado de molde

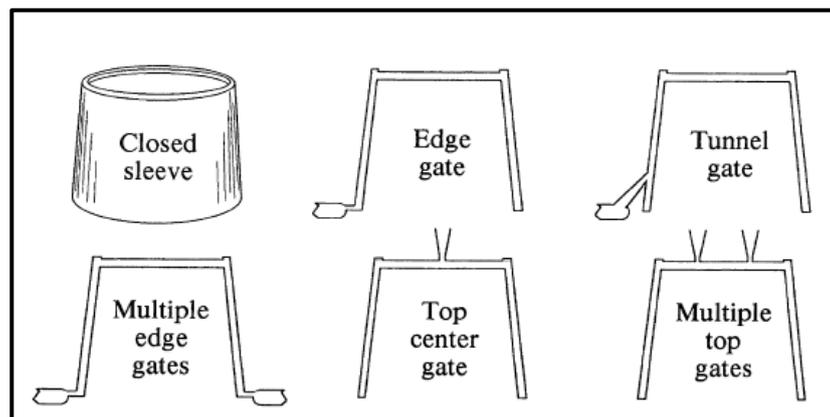
#### Consideraciones de la entrada a la cavidad del molde

Una de las decisiones más importantes asociadas al llenado del molde es determinar el tipo, número y ubicación de la entrada a la cavidad del molde usada para la pieza plástica. La entrada a la cavidad del molde es el punto de ingreso o punto de inyección del fundido hacia la cavidad del molde. El esquema de la puerta o puertas de entrada influenciará las fases de llenado, empaquetamiento y mantenimiento, y tendrá un alto impacto en las dimensiones finales, así como en su rendimiento y estética. El esquema de la entrada a la cavidad del molde puede influenciar la calidad de la pieza en muchas maneras, incluyendo:

- Patrón de llenado
- Calidad y ubicación de las líneas de soldadura
- Grados y dirección de la orientación
- Tolerancias dimensionales
- Habilidad para controlar las marcas de hundimiento
- Habilidad para controlar vacíos de contracción
- Distribución de presión en la cavidad
- Trampas de gas y tiros cortos
- Esfuerzos residuales
- Pandeo y llanura

En la figura 1.1 se consideran varias opciones para la ubicación de la entrada a la cavidad del molde. El esquema con una entrada simple en un

lado se puede producir en un molde de dos placas, sin embargo, este esquema puede producir una deflexión en el núcleo, trampas de gas y líneas de soldadura débiles además de problemas con las dimensiones. El esquema con múltiples entradas es una mejora al esquema de entrada única, sin embargo, las líneas de soldadura y la ventilación se convierten en un problema, además, se podrían generar rebabas.

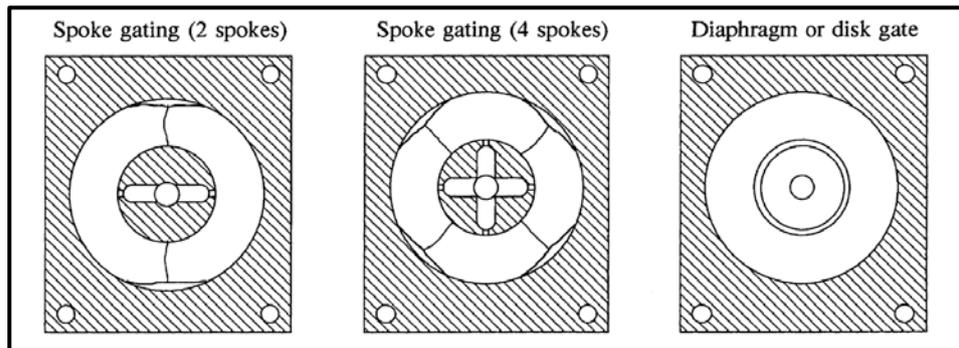


**Figura 1.1. Alternativas de ubicación de entrada a la cavidad del molde.**

Fuente: Malloy, 2010.

Para casos en que se presentan mangas cerradas, es recomendable ubicar la entrada a la cavidad del molde en la parte superior de la pieza. Esto producirá un flujo más estable, una ventilación natural en la línea de partición y no se producirán líneas de soldadura.

Los esquemas de las entradas a la cavidad del molde tienen un gran impacto sobre las dimensiones de las partes plásticas. En la figura 1.2 se muestran diversos tipos de esquemas para la fabricación de una pieza en forma de anillo. Las partes plásticas tienden a contraerse menos en las regiones cercanas a la entrada a la cavidad del molde debido a los gradientes de presión en la cavidad y los efectos de compresibilidad. Por esto, la entrada a la cavidad del molde en forma de disco presentada en la figura 1.2 resulta la mejor opción debido a que tendrá un flujo más balanceado, distribución uniforme de la presión, buen control dimensional y sin líneas de soldadura.



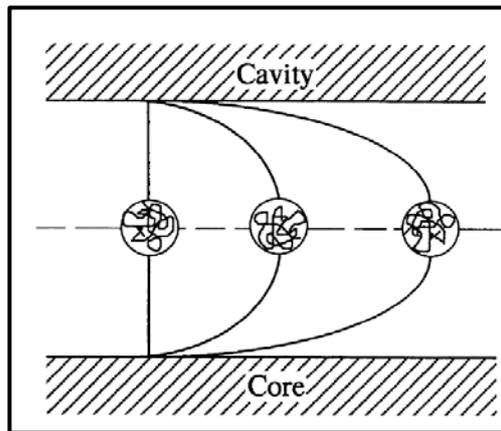
**Figura 1.2. Alternativas de entrada al molde para pieza en forma de anillo**

Fuente: Malloy, 2010.

### Orientación de llenado

La orientación molecular se desarrolla durante la fase de llenado de molde cuando el fundido es inyectado a través de la boquilla, el bebedero, la entrada a la cavidad del molde y la cavidad del molde. Las cadenas del polímero se estiran debido al gradiente de velocidad asociado con el comportamiento de flujo laminar. La forma embotada del perfil de velocidad de la mayoría de los polímeros causa que la mayoría de la orientación ocurra hacia la superficie de la parte, mientras que las moléculas en el núcleo se mantienen en una configuración de bobina aleatoria como se indica en la figura 1.3.

Este es un problema significativo en el moldeo por inyección debido a que el fundido adyacente a la cavidad del molde, que se encuentra relativamente fría, y el núcleo, se enfriarán primero, lo que genera un alto esfuerzo cortante interfacial entre el fundido y la capa sólida. Los problemas de orientación son más significativos en polímeros de cadenas largas con elevado peso molecular y polímeros de fibras reforzadas. A diferencia de las moléculas de los polímeros, las fibras reforzadas no se pueden relajar o reacomodarse incluso cuando existen condiciones favorables.



**Figura 1.3. Perfil de velocidad laminar pseudoplástico.**

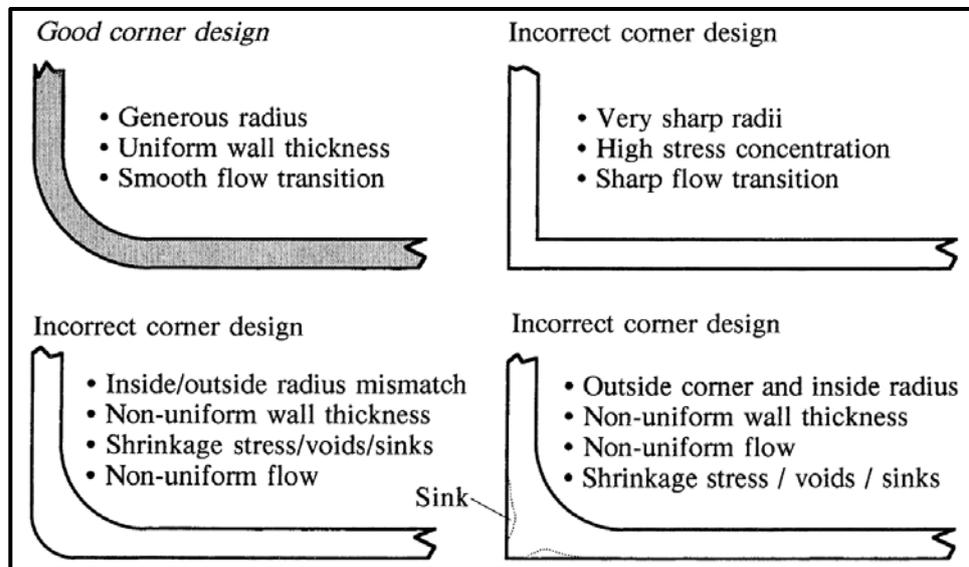
Fuente: Malloy, 2010.

El grado de orientación causado por el llenado del molde y el empaquetado es influenciado por las condiciones de procesamiento, las propiedades del material, el diseño de las herramientas y el diseño de la pieza. Por ejemplo, temperaturas más elevadas en las herramientas de trabajo promoverán la relajación molecular manteniendo el fundido caliente por periodos más largos de tiempo. Asimismo, guías de diámetro grande, bebedero y puertas de entrada, de la mano con longitudes de flujo más cortas tenderán a reducir la orientación.

Las altas velocidades de llenado y altas temperaturas del fundido tenderán a reducir el nivel neto de orientación promoviendo la relajación molecular. El cambio en la dirección del flujo se convierte en una preocupación cuando se habla de la orientación molecular y de las fibras.

Las esquinas, en particular las esquinas internas de la pieza deben contener radios muy generosos cuando sea posible. Las esquinas internas tienen la tendencia a orientarse e incluso causar degradación cortante en el fundido del polímero cuando fluye a altas velocidades. Los radios de las esquinas también reducirán cualquier esfuerzo concentrado asociado a esfuerzos residuales o cargas de servicio. Cuando se diseña una pieza

plástica, idealmente las esquinas deben verse similar a lo mostrado en la figura 1.4.



**Figura 1.4 Consideraciones de diseño de esquinas en piezas plásticas**

Fuente: Malloy, 2010.

Idealmente, las esquinas deben tener radios tanto interno como externamente. El grosor uniforme de la pared puede mantenerse siempre y cuando el radio externo es igual al interno más el grosor de la pared. Las secciones de pared gruesa en las esquinas pueden producir rechufe, vacíos, esfuerzos de contracción y las potenciales líneas de soldadura.

#### Caídas de presión en el llenado de molde

El proceso de llenado del molde de una pieza comienza en la entrada a la cavidad del molde y avanza mientras el fundido fluye a través del camino que ofrezca menor resistencia. La entrada a la cavidad del molde tiene que estar ubicada de tal manera que molde se llene uniformemente y la caída de presión a través de la cavidad no sea excesiva.

Es importante para el diseñador obtener un estimado de esa caída de presión para poder evaluar la moldeabilidad de la pieza respecto al esquema de entradas propuesto. La caída de presión y el patrón de llenado

pueden ser evaluados utilizando una simulación computarizada. Estas simulaciones del proceso ayudan al diseñador a evaluar la moldeabilidad de un producto pudiendo alterar el diseño de la pieza o herramienta, mucho antes de que la herramienta es cortada.

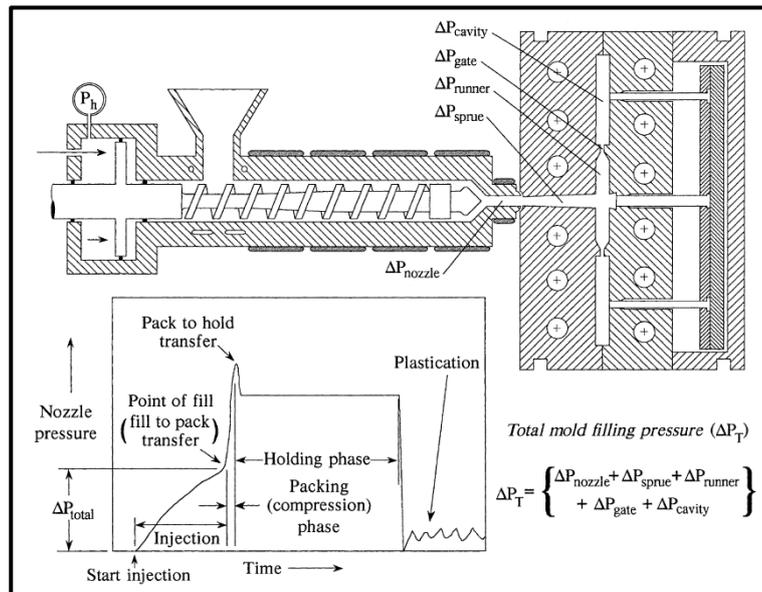
La pérdida o caída de presión asociada al llenado del molde estará influenciado por una serie de variables, entre las que se encuentran:

**Tabla 1.1 Variables que influyen la caída de presión**

<b>Variables</b>	<b>Propiedades</b>
Tipo de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades de flujo cortante</li> <li>• Propiedades térmicas</li> </ul>
Máquina moldeadora	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de presión de inyección</li> <li>• Pérdidas por fricción en el tornillo</li> <li>• Pérdidas en la boquilla</li> </ul>
Características del molde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de alimentación</li> <li>• Geometría de las guías, entrada y cavidad</li> <li>• Material de construcción</li> <li>• Capacidad de enfriamiento y calentamiento</li> <li>• Capacidad de ventilación</li> </ul>
Condiciones de procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura del fundido</li> <li>• Temperatura de las herramientas de trabajo</li> <li>• Velocidad de inyección</li> </ul>

Fuente: Malloy, 2010

Las pérdidas de presión están influenciadas por una serie de factores como se mencionó anteriormente. Es por esto por lo que una simulación del llenado del molde, que incluya el sistema de alimentación y la geometría de la boquilla de la máquina, se vuelve muy útil y realista ya que estas geometrías influyen la caída de presión y la distribución de temperatura, como se ilustra en la figura 1.5.

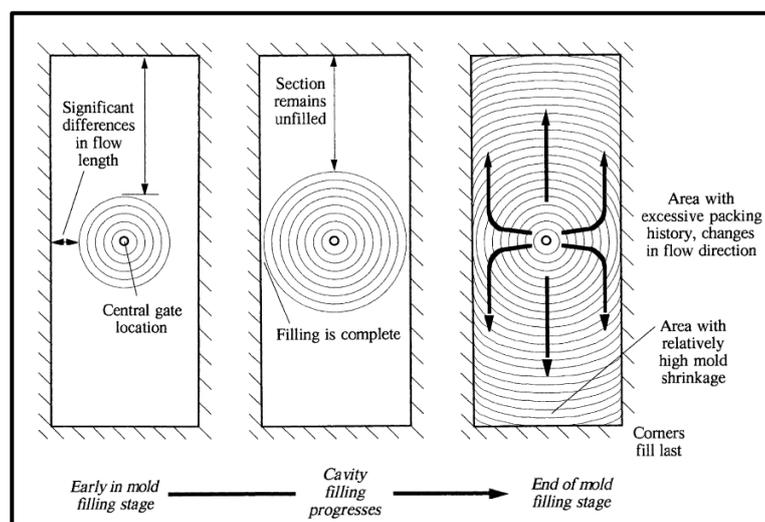


**Figura 1.5 Caídas de presión a la entrada de la máquina, sistema de alimentación y molde**

Fuente: Malloy, 2010.

Guías y restricciones de flujo

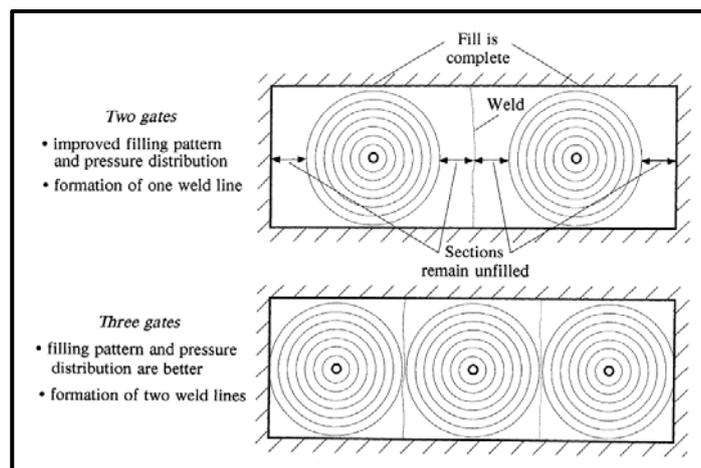
Idealmente, el fundido debe fluir desde la entrada a la cavidad del molde, alcanzando las extremidades de la cavidad al mismo tiempo. La parte mostrada en la figura 1.6. tiene pared de grosor uniforme, y como resultado, se observa un patrón de flujo radial al comienzo del llenado del molde.



**Figura 1.6 Patrón de flujo radial durante llenado del molde**

Fuente: Malloy, 2010.

El fundido alcanza el lado izquierdo y derecho del molde, mucho antes de que la parte superior e inferior del molde se llenen. Esto provoca una situación de sobre o bajo empaquetamiento y problemas con el cambio en la dirección del flujo. El resultado final será una pieza con una contracción variable, esfuerzos residuales y tendencia al pandeo. En la figura 1.7. se muestran alternativas en la ubicación de la entrada a la cavidad del molde para el molde rectangular.



**Figura 1.7 Patrones de flujo con dos y tres entradas en molde rectangular**

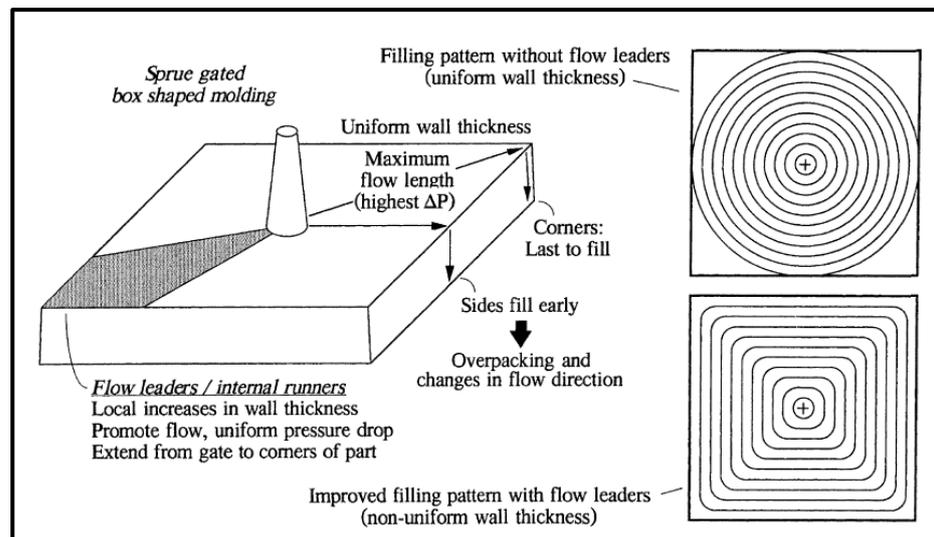
Fuente: Malloy, 2010.

Como sucede con la pieza con entrada a la cavidad del molde única, la pieza moldeada con dos puertas de entrada, provocan una situación de sobre empaquetamiento y cambios en la dirección de flujo, sin embargo, con un grado menor que con la entrada a la cavidad del molde única. Se puede observar que también se forma una línea de soldadura.

En la figura 1.7 también se muestra el patrón de flujo cuando se usan tres puertas de entrada, donde el patrón de llenado es más uniforme, sin embargo, las esquinas del molde y las líneas de soldadura son los últimos lugares en llenarse. Esto es inevitable cuando se trata de llenar una cavidad rectangular o cuadrada de pared constante con un patrón de flujo radial. Sin embargo, el patrón de llenado que tiene la pieza se puede modificar para que el fundido llegue a todos los rincones de la pieza al mismo tiempo.

Para alcanzar un flujo balanceado, la caída de presión de llenado, asociada con cada camino del flujo desde la entrada, debe ser igual. La caída de presión puede ser balanceada haciendo ajustes locales en el grosor de la pared de la pieza. Incrementos locales en el grosor de la pared (para promover el flujo) son conocidos como guías de flujo o guías internas, mientras que las reducciones en el grosor de la pared de la pieza (para obstaculizar el flujo) son conocidos como restricciones de flujo.

En el molde rectangular mostrado en la figura 1.8 se pueden engrosar las áreas diagonales hacia las esquinas de la pieza para promover el flujo hacia estas áreas de longitud máxima de flujo. Esta es una de las situaciones donde el diseñador se desvía de la regla de mantener una pared de espesor constante.



**Figura 1.8 Diferentes patrones de flujo con y sin el uso de guías**

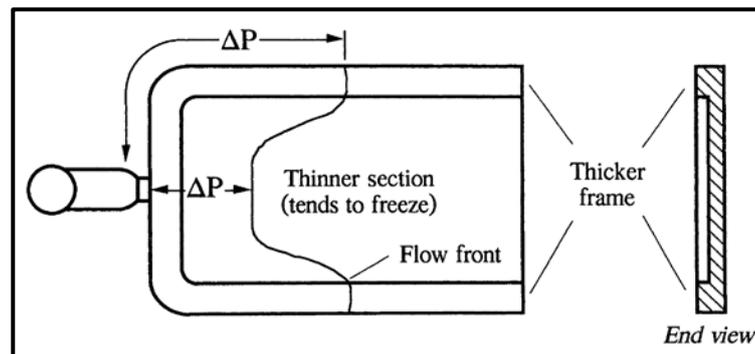
Fuente: Malloy, 2010.

Las guías de flujo se extienden desde la entrada a la cavidad del molde hacia las áreas difíciles de llenar mientras que las restricciones pueden ser colocadas a lo largo de las secciones de la cavidad que se llenan con mayor facilidad. Estos cambios en el espesor de la pared son generalmente incorporados en las áreas no visibles o menos visibles de la pieza. Los refuerzos que son comúnmente utilizados para endurecer partes plásticas

pueden también ser usadas como guías de flujo cuando son correctamente dimensionadas y posicionadas.

### Flujo vacilante

Muchas partes plásticas son diseñadas con pared de espesor variable. Las paredes de espesor variable promueven una variedad de problemas relacionados con la contracción y pueden promover dificultades durante el llenado del molde. La figura 1.9 muestra una pieza que tiene una sección delgada rodeada de un marco grueso.



**Figura 1.9 Pieza plástica con espesores de pared variable**

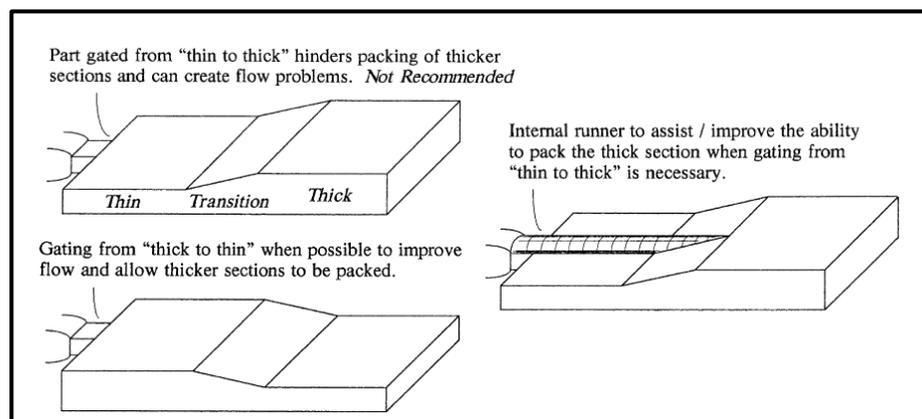
Fuente: Malloy, 2010.

La entrada a la cavidad del molde fue ubicada en la sección de mayor espesor para que esta sección se pueda llenar aun cuando la sección delgada se haya enfriado. Sin embargo, durante el llenado del molde, el fundido tenderá a recorrer alrededor de la sección de mayor espesor que es el camino de menor resistencia. El fundido en la región delgada tenderá a hesitar hasta que la sección de mayor espesor se llene, donde el flujo empezará a fluir nuevamente. Esto provocará la presencia de altos esfuerzos residuales, mala apariencia superficial, trampas de gas y tiros cortos en casos extremos. En este caso, la sección delgada está actuando como una restricción de flujo.

La manera más fácil para mejorar esta situación es evitando el uso de pared de espesor variable. Colocar la entrada a la cavidad del molde en las

secciones más delgadas puede minimizar los problemas de llenado, pero pueden provocar problemas de empaquetamiento en las secciones de mayor espesor.

Cuando la pieza tiene espesor variable se debe colocar la entrada a la cavidad del molde en la sección de mayor espesor de este, como se muestra en la figura 1.10. La sección de mayor espesor de la pieza requiere una mayor compensación a la contracción y empaquetamiento y por lo tanto debe ser ubicado cercana a la entrada de la cavidad del molde.



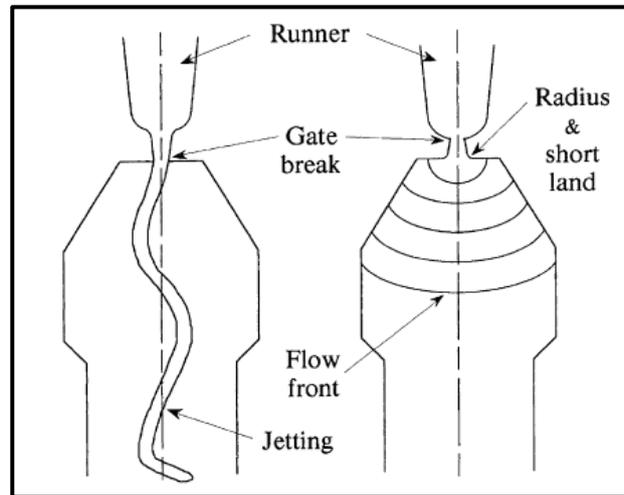
**Figura 1.10 Alternativas de ubicación de la entrada al molde en pieza con espesor de pared variable**

Fuente: Malloy, 2010.

Si esto no se hace, la sección más delgada puede llegar a enfriarse y perder la capacidad de empaquetar la sección de mayor espesor. Mientras que colocar la entrada a la cavidad del molde en las secciones de mayor espesor en una pieza plástica provee mayor control sobre el empaquetado, puede producir otro problema de moldeo como el rociado.

El rociado puede ocurrir cuando se coloca la entrada a la cavidad del molde en una sección abierta y gruesa como se observa en la figura 1.11. Cuando esto ocurre, el fundido tiende a fluir hacia la profundidad de la cavidad en vez de desarrollarse un flujo de frente uniforme, lo que provocará que la parte moldeada tenga una mala apariencia superficial. El chorro a modo de

cuerda se enfría durante las primeras etapas del proceso de llenado y no se suelda correctamente. De manera aún más importante, las propiedades mecánicas y químicas de las partes se ven afectadas cuando ocurre el rociado.



**Figura 1.11 Frente del flujo de pieza con rociado y pieza con frente de flujo uniforme**

Fuente: Malloy, 2010.

Estos efectos pueden ser minimizados o eliminados con un correcto diseño de la entrada a la cavidad. Por ejemplo, longitudes cortas de la entrada a la cavidad del molde, promueven la expansión del fundido mientras ingresa a la cavidad debido a los efectos de memoria elástica. Colocar las entradas a la cavidad del molde en algún tipo de obstructor de flujo también ayudará al desarrollo del frente de flujo del fundido, lo que minimizará el potencial de rociado en la pieza.

### 1.3.2 Líneas de soldadura

Las líneas de soldadura son formadas durante el proceso de llenado del molde cuando el frente del flujo del fundido se separa y se recombina en algún punto después. La división o separación del flujo puede ser causada por núcleos u obstrucciones, espesores de pared variables y por varias

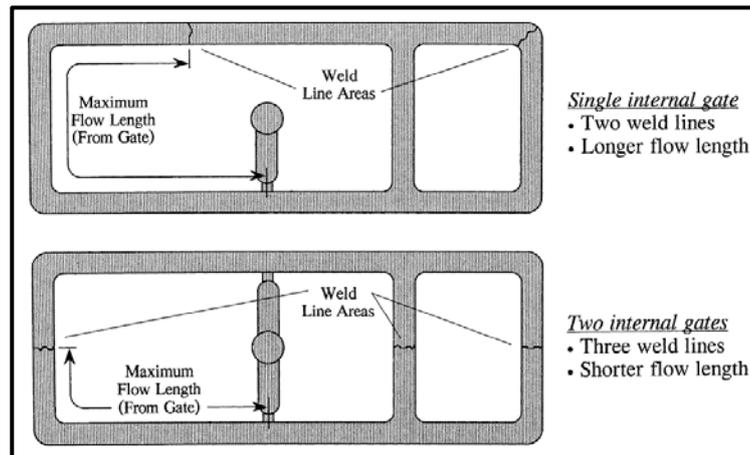
puertas de entrada. El rociado también puede provocar la formación de líneas de soldadura en una parte moldeada.

Las líneas de soldadura tienen la apariencia de grietas en la superficie de la pieza. Estas grietas son visibles al ojo humano y son estéticamente inaceptables en muchas aplicaciones. Además de esto, la resistencia mecánica en el área de la soldadura puede ser significativamente menor que la resistencia fuera de la soldadura. Esto puede provocar un problema particular en piezas que estén sometidas a cargas mecánicas. El diseñador debe reconocer que la resistencia mecánica de la soldadura, la resistencia química y la apariencia están influenciadas por:

- Selección del material
- Diseño de la pieza
- Diseño del molde
- Condiciones de procesamiento

Probablemente la regla de diseño más importante es colocar la línea de soldadura en lugares donde la estética y el rendimiento mecánico no sea crítico. Una de las variables, como la longitud de flujo antes de la recombinación de los frentes, pueden tener un efecto importante en el rendimiento de la soldadura como se muestra en la figura 1.12. Se prefiere tener un número grande de líneas de soldadura con alta resistencia, que tener un número bajo de líneas de soldadura con baja resistencia.

Desafortunadamente, las diferencias en la resistencia son casi imposibles de predecir, así como la apariencia de la superficie. La textura de la superficie del molde, combinada con el uso de plástico de colores más claros, tienden a disfrazar las imperfecciones asociadas a las líneas de soldadura.



**Figura 1.12 Efecto de la ubicación de la entrada sobre la longitud del flujo**

Fuente: Malloy, 2010.

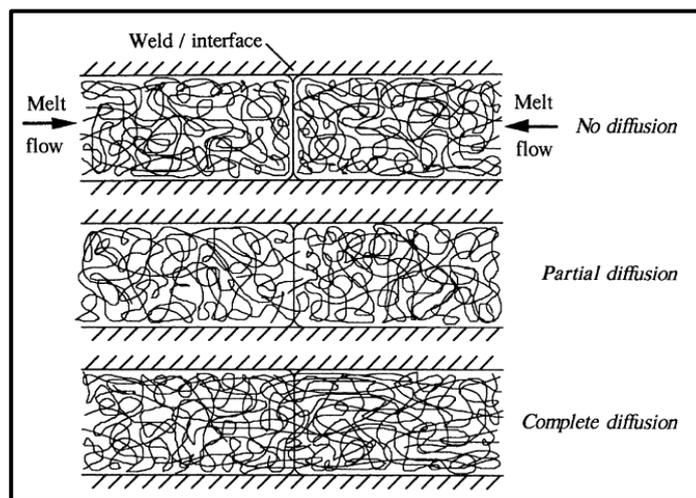
Las simulaciones por computadora pueden ser utilizados para predecir la ubicación de las líneas de soldadura, permitiendo al diseñador modificar la geometría de la pieza o la ubicación de la entrada a la cavidad del molde. Sin embargo, las simulaciones por computadora no brindan la resistencia y apariencia que tendrán las líneas de soldadura. A pesar de esto, el diseñador puede evaluar las variables de salida, como la temperatura del fundido o la distribución de temperatura a través el espesor de la pieza en la soldadura, y deducir que fundidos más calientes producirán soldaduras más resistentes.

Las debilidades en las líneas de soldadura han sido atribuidas a una variedad de factores, los cuales juegan un rol significativo. Estos factores incluyen:

- Incompleta difusión molecular.
- Orientación molecular desfavorable.
- Presencia de muescas en la superficie de la soldadura.
- Presencia de sustancias extrañas en la interfaz de la soldadura.

En la figura 1.13. se muestra la unión en el núcleo del plano de soldadura que representa la mayor parte de la fuerza de la soldadura. Como en

cualquier proceso de soldadura, la difusión molecular y el subsecuente enredo molecular son necesarios para lograr una buena resistencia en la soldadura. Las variables del proceso tales como la temperatura del fundido, velocidad de inyección y la presión de empaquetamiento han mostrado tener un impacto en la resistencia de la soldadura.

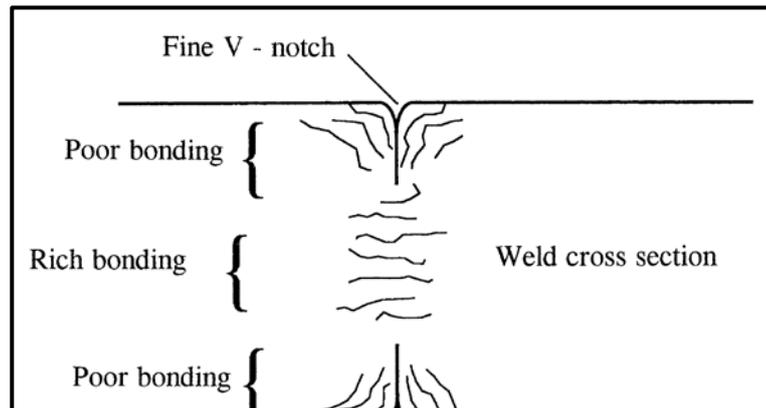


**Figura 1.13 Difusión molecular en el plano de soldadura**

Fuente: Malloy, 2010.

La temperatura de la cavidad, la presión y el tiempo de mantenimiento son también importantes, sin embargo, la importancia de una variable de proceso particular depende del material. La mayoría de los estudios indican que la temperatura del fundido en la soldadura es la variable de proceso más importante dada su influencia en la movilidad molecular.

El diseñador de las piezas puede mejorar la resistencia de las soldaduras manteniendo longitudes de flujo tan cortas como sea posible. La figura 1.14 muestra una sección con un enlace pobre, adyacente a una sección con un buen enlace, descrita como un estado de “pre-agrietamiento”. La difusión no toma lugar en esta sección del plano de soldadura, y puede ocurrir una situación de orientación debido al comportamiento de flujo de fuente del frente del fundido.



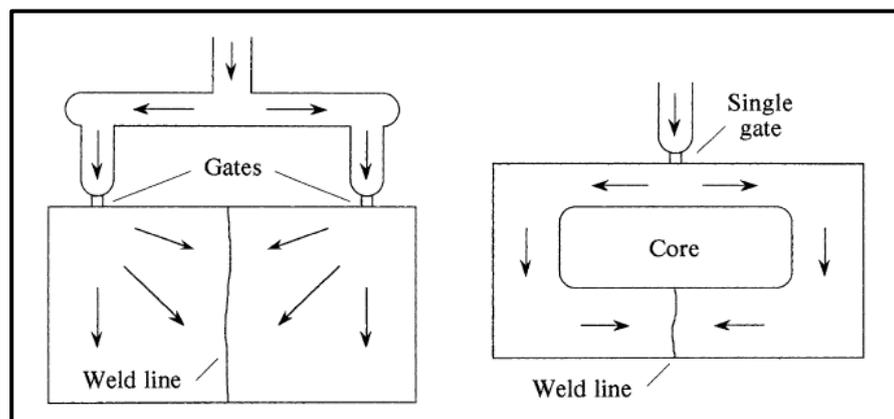
**Figura 1.14 Enlaces en la sección transversal del plano de soldadura**

Fuente: Malloy, 2010.

El defecto de la muesca puede ser observada en la línea de soldadura. La muesca es un problema estético y también puede actuar como un concentrador de esfuerzos en piezas sometidas a esfuerzos de flexión o tracción.

### Tipos de líneas de soldadura

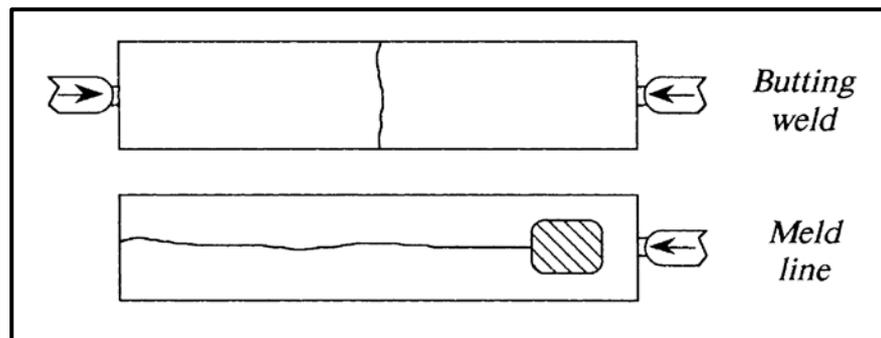
Para describir las líneas de soldadura se usan una variedad de términos. Las líneas de soldadura se originan debido a la división y recombinación del frente del flujo del fundido. La división del flujo se debe al recorrido del fundido alrededor de un núcleo o debido a múltiples puertas de entrada como se muestra en la figura 1.15.



**Figura 1.15 Origen de las líneas de soldadura**

Fuente: Malloy, 2010.

Las líneas de soldadura son categorizadas de acuerdo con la cantidad de flujo que sigue a la recombinación de los frentes. La línea de soldadura se forma cuando los frentes del fundido viajando en direcciones opuestas se encuentran y son casi inmediatamente inmovilizados. A este tipo de soldadura se llama regularmente soldadura a tope o soldadura en frío. Otros tipos de soldadura involucran flujo adicional en el molde después que los frentes del fundido se han recombinado. A este tipo de soldadura se llama línea de unión, soldadura de transmisión o soldadura en caliente. Ejemplos de cada una se pueden observar en la figura 1.16.



**Figura 1.16 Tipos de línea de soldadura**

Fuente: Malloy, 2010.

La apariencia de las líneas de soldadura está correlacionada al ángulo específico en que se encuentran los dos frentes de flujo. Estudios demuestran que las líneas de soldadura tienden a desaparecer a un ángulo particular llamado “ángulo de fuga”. Este ángulo se encuentra entre 120° y 150°, dependiendo del material.

El diseñador también debe considerar la ubicación y el número de líneas de soldadura a lo largo de una pieza. Por ejemplo, en una estructura tipo parrilla, que tiene varios núcleos tiene como resultado varias líneas de soldadura. La resistencia de la soldadura ha mostrado estar influenciada por la forma y el tamaño del núcleo y por el número de núcleos.

### Consideraciones del material

Las líneas de soldadura son más problemáticas con algunos materiales plásticos que con otros. Las variables que deben considerarse incluyen la morfología, peso molecular promedio y el empaquetamiento. La tabla 1.1 presenta los esfuerzos de flexión para una variedad de resinas plásticas.

**Tabla 1.2 Esfuerzos de flexión para distintos materiales**

<b>Tipo de material</b>	<b>Tipo de refuerzo</b>	<b>Retención de la resistencia a la tracción (%)</b>
Polipropileno	Sin refuerzo	86 %
Polipropileno	20% fibra de vidrio	47 %
Polipropileno	30% fibra de vidrio	34 %
SAN	Sin refuerzo	80 %
SAN	30% fibra de vidrio	40 %
Policarbonato	Sin refuerzo	99 %
Policarbonato	10% fibra de vidrio	86 %
Policarbonato	30% fibra de vidrio	64 %
Polisulfona	Sin refuerzo	100 %
Polisulfona	30% fibra de vidrio	62 %
PPS	Sin refuerzo	83 %
PPS	10% fibra de vidrio	38 %
PPS	40% fibra de vidrio	20 %
Nailon 66	Sin refuerzo	83-100 %
Nailon 66	10% fibra de vidrio	87-93 %
Nailon 66	50% fibra de vidrio	56-64 %

Fuente: Malloy, 2010.

Los factores de retención de las resistencias de la soldadura para las resinas base no reforzadas, para amorfos y semi-cristalinos, se encuentran alrededor del 80 al 100%. Los estudios han demostrado que, para las resinas amorfas vidriosas, la temperatura del fundido es la variable de proceso más importante que afecta la resistencia de la soldadura. Para los polímeros semicristalinos, la temperatura del fundido, la temperatura de las

paredes del molde, la velocidad de inyección y el recocido post moldura, han mostrado tener efecto sobre la resistencia de la soldadura.

Los polímeros que contienen aditivos pueden mostrar resultados diferentes. Los aditivos, tales como, lubricantes externos, desmoldantes y algunos retardadores de llama, pueden tener un efecto negativo sobre el rendimiento de la soldadura debido a la contaminación en la zona de soldadura y a la posible desgasificación.

### **1.3.3 Contracción y pandeo**

Muchas partes plásticas exhiben grandes valores de contracción, y desafortunadamente, la contracción no es siempre isotrópica por naturaleza. Si una pieza plástica muestra una contracción anisotrópica, establecer la cavidad del molde no es tan fácil como escalar el mismo. Adicional a esto, la contracción anisotrópica provocará cierto grado de pandeo o esfuerzos internos.

En la práctica, las dimensiones, el potencial de pandeo y los niveles de esfuerzos internos de una pieza plástica, estarán influenciados por la variedad del material, la geometría de la pieza, herramientas y factores de procesamiento.

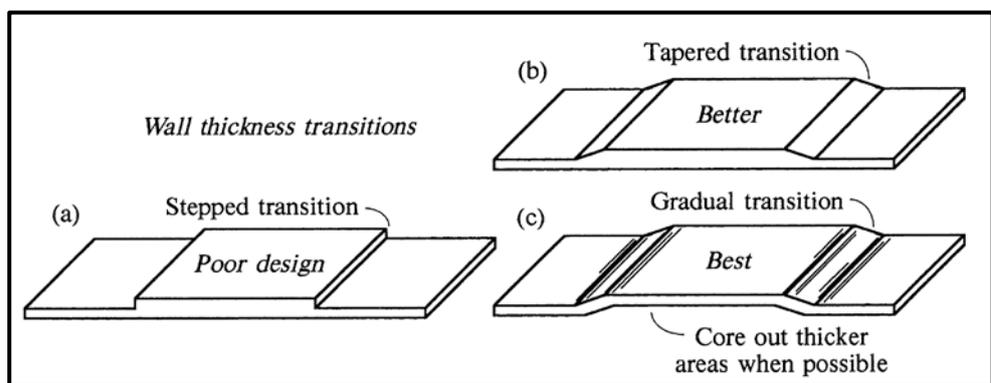
#### Variaciones del espesor de la pared

Las variables del proceso, tales como la magnitud de la presión de empaquetamiento y mantenimiento, tienen gran influencia sobre la contracción y las dimensiones finales de la pieza final. Si estas presiones no existieran, la contracción del material plástico puede llegar al 25%.

Las piezas con paredes gruesas son más difíciles de enfriar y empaquetar. Las secciones de gran espesor toman más tiempo de enfriar y requieren de empaquetamiento adicional. Cuando la pieza tiene secciones de espesor grueso y delgado, se prefiere ubicar la entrada a la cavidad del molde en la

sección con espesor más grande porque permite el empaquetamiento de esta sección aun cuando la sección de espesor más delgada se haya solidificado. Los requerimientos de enfriamiento y empaquetamiento de las secciones gruesas y delgadas pueden provocar esfuerzos internos relacionados con la contracción en las áreas de transición de espesor.

Cuando las variaciones de espesor deben ser incorporados en el diseño de una pieza, se puede utilizar una transición gradual (generalmente de longitud igual a tres veces la diferencia entre los dos espesores) para evitar una alta concentración de esfuerzos como se muestra en la figura 1.17.



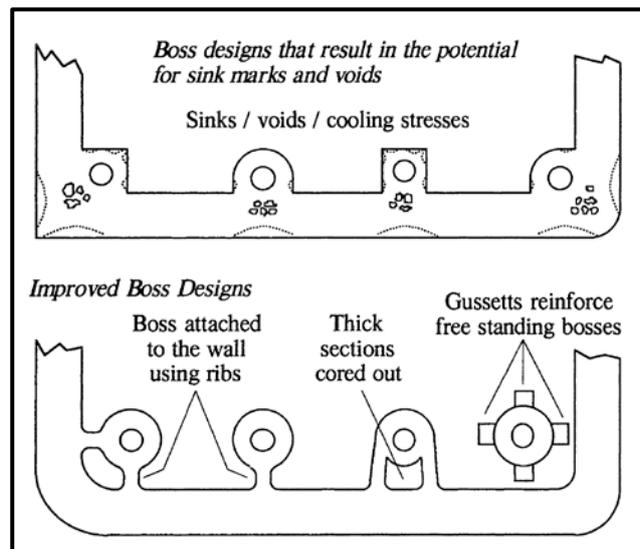
**Figura 1.17 Diseño de transiciones para cambios de espesor**

Fuente: Malloy, 2010.

Estas transiciones también proveen un flujo de transición gradual durante el llenado del molde. Cuando sea posible, lo mejor es evitar las paredes de espesor grueso debido a los problemas de contracción y la extensión del tiempo de enfriamiento. Esto puede ser logrado retirando material en el núcleo del área de transición y colocando refuerzos para compensar la pérdida de rigidez de la ahora sección delgada.

En la práctica, es casi imposible mantener espesor de pared uniforme debido a la complejidad en el diseño de una pieza. Las características de diseño tales como grabados (figura 1.18), guías de flujo y refuerzos, resultan en cambios de espesor y como resultado representan áreas donde se desarrollan esfuerzos.

Los espesores de pared se pueden volver excesivos cuando se utilizan los grabados y son incorporados a la pared de la pieza. Esto resultará en la formación de rechupes y porosidades. Las porosidades se forman cuando la piel sólida es lo suficientemente resistente para soportar la presión negativa que se construye mientras el fundido del polímero se enfría y se contrae sin compensación. El fundido cavitará y formará porosidades en vez de deformar la piel sólida. El rechupe es indeseable desde el punto de vista estético, mientras que las porosidades son discontinuidades que actúan como concentradores de esfuerzos durante el servicio.



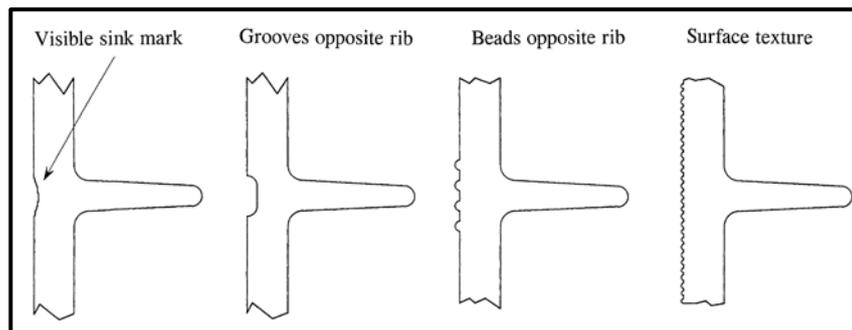
**Figura 1.18 Diseño de refuerzos para evitar contracción y porosidades**

Fuente: Malloy, 2010.

El rechupe y las porosidades son problemas comunes en piezas que contienen refuerzos en la parte inferior del molde. Los refuerzos gruesos proveen beneficios estructurales y son más fáciles de llenar; sin embargo, el nivel de rechupe asociado con refuerzos gruesos puede ser excesivo. El rechupe puede ser magnificado si se utilizan radios grandes en las paredes que se intersecan. En la práctica, el espesor de los refuerzos debe estar entre el 40% y el 80% del espesor de la pared en que se extienden, con radios base con valores entre el 25% y 40% del espesor de la pared. El diseño específico del refuerzo es dependiente del material, y están

influenciados principalmente por las características de contracción del material.

Cuando se siguen guías de diseño, se puede minimizar el rechupe asociado con las características de la pieza tal como un refuerzo, sin embargo, se podría aun apreciar cierto grado de rechupe. Ubicar el canal de enfriamiento del molde en el área de rechupe puede mejorar la severidad de este. Algunos métodos pueden ser utilizados para ocultar el rechupe en las partes plásticas como se muestra en la figura 1.19.



**Figura 1.19 Alternativas para ocultar el rechupe en piezas plásticas**

Fuente: Malloy, 2010.

Una de las razones más comunes para utilizar texturas superficiales en el moldeo por inyección es para ocultar defectos estéticos tales como rechupes y líneas de soldadura.

### Contracción anisotrópica y pandeo

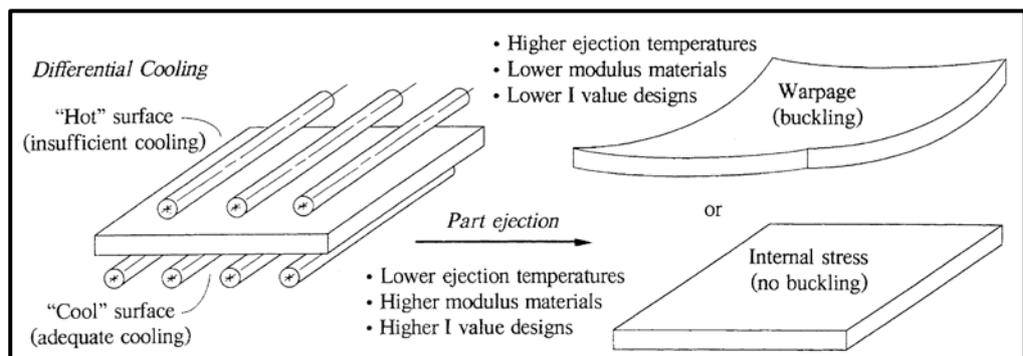
La contracción anisotrópica es un fenómeno indeseable en el moldeo por inyección porque puede producir dificultades en el dimensionamiento de la pieza, esfuerzos internos y pandeo cuando los esfuerzos internos son lo suficientemente elevados para causar la deformación de la pieza. Se puede utilizar simulación asistida por computadora para optimizar el diseño de la pieza y para minimizar el potencial de contracción y pandeo mucho antes de que el molde sea construido. Existen una variedad de factores que

influyen en el comportamiento no uniforme de contracción, donde se incluyen:

- Contracción térmica asimétrica debido al enfriamiento no uniforme de la pieza.
- Contracción volumétrica no uniforme.
- Comportamiento anisotrópico del material debido a la orientación del flujo inducido.
- Tensión térmica diferencial debido a los efectos geométricos.

### Enfriamiento diferencial

La contracción diferencial a través del espesor de la pieza puede ser causada por la diferencia en la velocidad de enfriamiento entre la cavidad y el núcleo. Debido a la complejidad de muchas piezas y diseños de moldes, es difícil alcanzar el enfriamiento uniforme en la práctica. El enfriamiento no uniforme causa contracción térmica diferencial del polímero a lo largo del espesor de la pieza desde la temperatura inicial del proceso hasta la temperatura ambiente. Las superficies más calientes de la pieza continuarán contrayéndose más que las superficies más frías después que la entrada se selle y la pieza se eyecte como se observa en la figura 1.20.

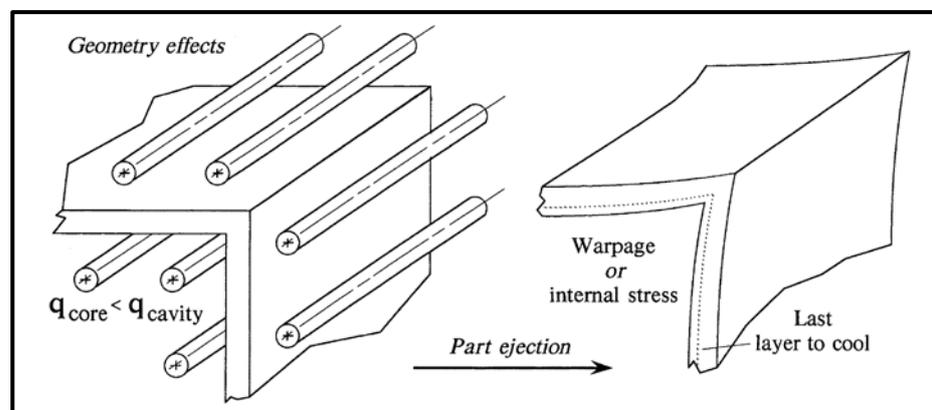


**Figura 1.20 Enfriamiento diferencial de una pieza**

Fuente: Malloy, 2010.

La contracción diferencial causa momentos internos que son capaces de deformar la pieza luego que se expulsa del molde. Cuando la pieza es lo suficientemente rígida para prevenir la deformación porque tiene un módulo alto o características geométricas de refuerzo, mantendrá su forma, pero sufrirá esfuerzos internos. Esto es importante debido que los esfuerzos internos pueden producir una reducción en la resistencia al agrietamiento, en el rendimiento ante el impacto y el potencial de pandeo si la pieza expuesta es elevada a altas temperaturas.

La contracción diferencial a través del espesor de la pieza también puede ser causada por diferencias de temperatura entre la cavidad y el núcleo de la geometría que ocurre en áreas como las esquinas. Comparado al lado de la cavidad, el núcleo tiene un área reducida y puede resultar difícil de enfriar en la práctica debido a, por ejemplo, problemas estructurales. El núcleo de la pieza tiende a permanecer caliente y por ende se contrae más cuando la pieza se expulsa. Como resultado, se produce un momento que causa que la pieza se pandee hacia dentro después de la eyección del molde, como se muestra en la figura 1.21.



**Figura 1.21 Pandeo producido por el enfriamiento diferencial**

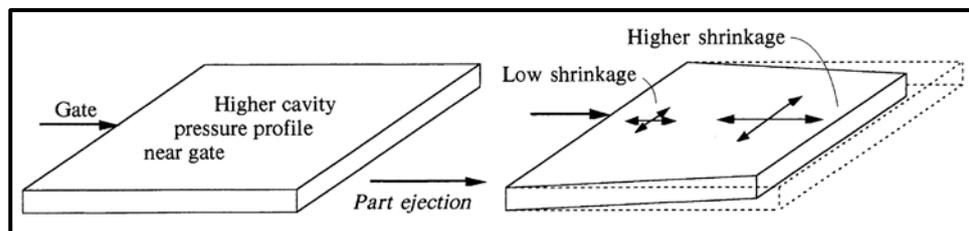
Fuente: Malloy, 2010.

El problema de enfriamiento diferencial puede ser minimizado con un correcto diseño del sistema de enfriamiento. Algunos de los problemas del

pandeo pueden ser corregidos durante la producción si el molde ha sido construido de tal manera que la cavidad y el núcleo de tienen circuitos de enfriamiento individuales, permitiendo al ingeniero realizar ajustes locales a la temperatura del molde para controlar la velocidad de enfriamiento de cada superficie.

### Presión diferencial en la cavidad

La magnitud de la presión de empaquetamiento y mantenimiento utilizadas durante el procesamiento, tienen un efecto significativo en la contracción de la pieza. Altas presiones de empaquetamiento y mantenimiento tienden a reducir la contracción de la pieza, mientras que presiones más bajas incrementan la contracción. Desafortunadamente, las presiones en la cavidad varían desde un máximo en la entrada hasta un mínimo al final de flujo debido a la compresibilidad del fundido. La diferencia de presión a lo largo de la cavidad puede ser significativa, particularmente para flujos de longitudes largas o piezas con espesor de pared delgado. Esta diferencia en la contracción puede producir cierta distorsión dimensional o pandeo en la parte como se muestra en la figura 1.22.



**Figura 1.22 Distorsión dimensional debido a presión diferencial**

Fuente: Malloy, 2010.

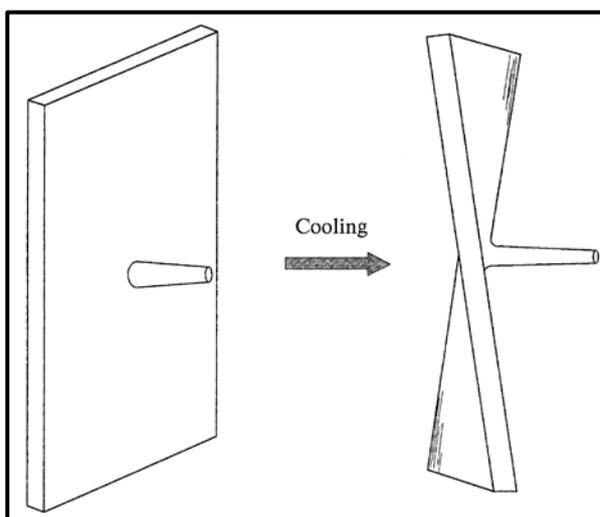
La contracción diferencial también complica el dimensionamiento de la cavidad para el diseñador. Una manera de resolver este problema es utilizar varias entradas a la cavidad. De esta manera, la longitud del flujo se acorta y la presión de la cavidad tiende a ser más uniforme porque todas las secciones de la pieza están cerca de la entrada.

### Flujo radial

Las piezas producidas con una entrada centrada ubicada en la parte superior se llenan a través de flujo radial. Si existe contracción diferencial, las piezas con entrada centrada pueden permanecer planas, deformarse en forma de cúpula o deformarse en forma de silla de montar. Si las piezas no se deforman, es un indicador que, o la contracción es uniforme, o la resistencia del material es lo suficientemente alta para resistir los esfuerzos de contracción.

Si la contracción diferencial está presente y la pieza no tiene la suficiente resistencia para resistir los esfuerzos de contracción, puede ocurrir pandeo o distorsión dimensional. El pandeo con forma de silla de montar, como se muestra en la figura 1.23, es causada si la contracción de regiones interiores es mayor que aquellas de las regiones exteriores, o cuando contracciones radiales son mayores que aquellos en dirección circunferencial.

En cualquier caso, el pandeo de la pieza puede ser minimizado reduciendo el grado de contracción diferencial debido a los efectos combinados del empaquetamiento, orientación o enfriamiento diferencial.



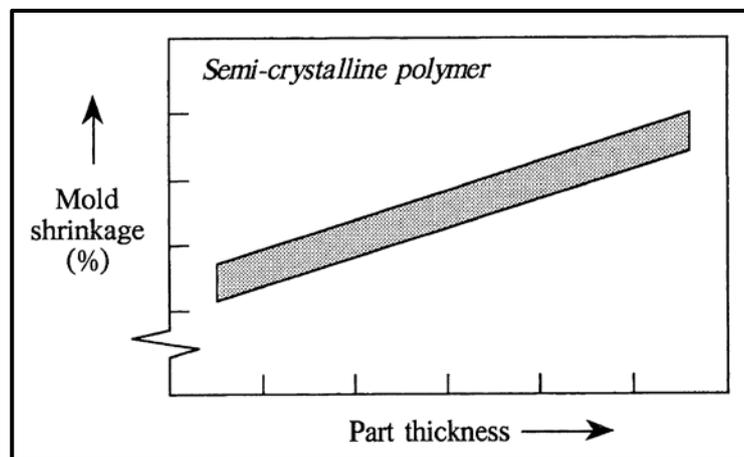
**Figura 1.23 Pandeo en forma de silla de montar**

Fuente: Malloy, 2010.

### Consideraciones de material

Todos los materiales termoplásticos tienen el potencial de exhibir contracción diferencial debido a la orientación, empaquetamiento o diferencia en la velocidad de enfriamiento. Las diferencias relacionadas a la contracción existen para todos los polímeros, pero existe una preocupación para los polímeros semicristalinos.

El efecto del espesor de la pieza es mucho más significativo con un polímero semicristalino. El comportamiento general de este polímero se puede observar en la figura 1.24. Se esperan contracciones más altas para polímeros semicristalinos cuando se utilizan paredes de espesor más grandes debido al incremento del tiempo de enfriamiento.



**Figura 1.24 Comportamiento general de polímero semicristalino de acuerdo con el espesor de pared**

Fuente: Malloy, 2010.

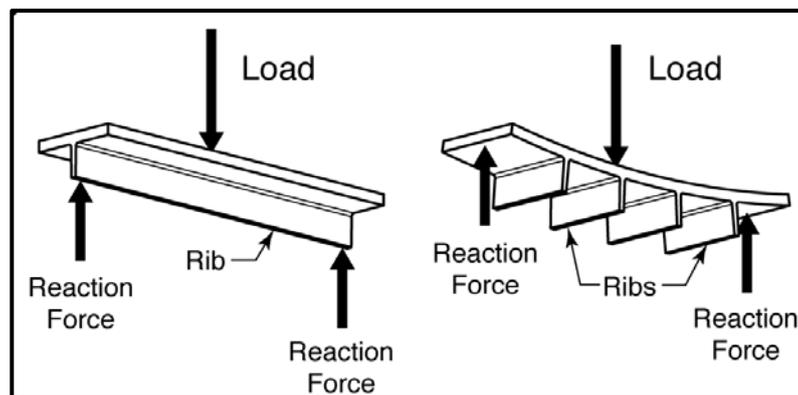
Las condiciones de procesamiento que influyen en la velocidad de enfriamiento también influenciarán la contracción de un polímero semicristalino. Estas condiciones tenderán a promover la cristalización y por ende los diseñadores pueden utilizar estas condiciones para controlar la contracción hasta cierto punto.

### 1.3.4 Sugerencias de diseño

#### Refuerzos y nervaduras

Las nervaduras son elementos delgados semejantes a las paredes, diseñados para proveer un soporte adicional a ciertos elementos de una pieza plástica. De igual manera, los refuerzos son elementos que refuerzan secciones como paredes o protuberancias de una pieza plástica.

Los refuerzos y nervaduras proporcionan estabilidad y rigidez a las piezas sin necesidad de aumentar el espesor de las paredes como se observa en la figura 1.25. Esto resulta beneficioso para piezas con paredes de espesor delgado que pueden debilitarse por su uso frecuente. Estas características no deben superar el 60% del espesor de la pared sobre la cual se levantan para evitar marcas de hundimientos. (Kazmar, 2007)



**Figura 1.25 Diseño efectivo de refuerzos**

Stratasys, 2015

#### Consideraciones de material

La selección del material para el moldeo de la pieza es importante para conseguir la rigidez, dureza y durabilidad deseada. Es importante equilibrar la relación entre todas las propiedades requeridas de acuerdo con el material y a la utilidad de la pieza. Las diferentes propiedades del material varían de acuerdo con el tipo de resina utilizada. Entre ellas se tiene:

El ABS es una resina estable, con una buena calidad y además es adecuada para productos de consumo masivo. Esta resina confiere dureza y resistencia al impacto en situaciones de trabajo normales. Esta resina se utiliza regularmente para carcasas de controles remoto, herramientas alimentadas por baterías y paneles estructurales de impresoras, monitores y fotocopiadoras. Sin embargo, el ABS sufre problemas de resistencia química.

El policarbonato tiene mayor resistencia a los impactos que el ABS, por lo que resulta adecuado para lentes y piezas donde se requiera más brillo. Esta resina es sensible a la fisuración por tensión y tiende a correr el riesgo de agrietamiento por cuestiones de compatibilidad química.

El nailon sin rellenar es una resina flexible y con resistencia al impacto, además de tener una muy buena lubricidad frente al desgaste. El relleno de fibra de vidrio incrementa la resistencia a la compresión del nailon, así como también su rigidez, sin embargo, el material se vuelve más sensible y frágil a los impactos. El relleno de fibra de vidrio también incrementa la deflexión térmica.

El acetal es un excelente material que posee propiedades autolubricantes para rodamientos, con excelentes propiedades antidesgaste y buena rigidez. Sin embargo, no es adecuado para piezas estéticas o piezas que requieran tampografía, pintura o adhesivos. (Kazmar, 2007)

Los TPE son fantásticos para la resistencia al impacto de juntas antipolvo y esquinas rellenas, y se usan en aplicaciones de sobremoldeo por sus características de agarre. No siempre tienen buenas aplicaciones dinámicas; las aplicaciones estáticas son mejores. Con los TPE pueden presentarse problemas de resistencia química. (Kazmar, 2007)

### Ángulos de inclinación

Durante la fabricación de piezas por moldeo por inyección, es fundamental agregar un ángulo de inclinación en la pieza para poder mejorar su

manufacturabilidad. Sino existe este ángulo, pueden surgir errores estéticos en la pieza, donde incluso podría romperse o pandearse, como consecuencia de los esfuerzos producidos al momento de la eyección.

Para facilitar la moldeabilidad de la pieza, se recomiendan seguir las siguientes consideraciones:

Prever ángulos de inclinación desde el principio: Se recomienda diseñar la pieza con ángulos de inclinación desde las etapas iniciales para evitar posibles costos de rediseños y desarrollo de prototipos adicionales.

Seguir reglas de creación para ángulos de inclinación: Durante el diseño de una pieza plástica, se debe dejar el máximo ángulo de inclinación que sea posible. En general, se requiere 1 grado de ángulo de inclinación por cada 25 milímetros de profundidad de la cavidad. Se debe cumplir las siguientes directrices generales:

- Se recomienda 0.5 grados en todas las caras verticales.
- De 1 a 2 grados se adaptan para la mayoría de las situaciones.
- 3 grados es el valor mínimo para el cierre. (Proto Labs, 2017)

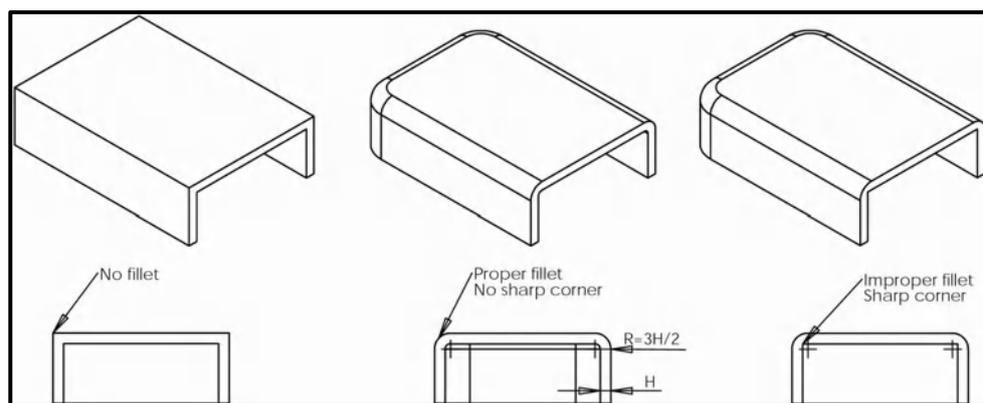
#### Diseño de esquinas

En el diseño de piezas plásticas se requiere en ciertas ocasiones la inclusión de esquinas pronunciadas. Sin embargo, este tipo de diseño debe evitarse por muchas razones relacionadas al rendimiento del producto, diseño del molde y proceso de inyección:

- Con respecto al rendimiento mecánico de la pieza, las esquinas pronunciadas resultan en concentración de esfuerzos que hacen que los materiales fallen cuando se someten a cargas.

- Con respecto al diseño del molde, las esquinas pronunciadas pueden ser muy difíciles de fabricar, requiriendo el uso de máquinas especiales para maquinar o el uso de varias herramientas de corte.
- Con respecto al proceso de moldeo, las esquinas agudas restringen el flujo de calor desde el polímero hasta el interior de la pieza mientras facilita la transferencia de calor hacia la parte exterior de la pieza. Esto tiene como resultado contracción diferencial a través del espesor de la pieza cerca de la esquina y el pandeo de la pieza.

La guía general para la inclusión de esquinas en una pieza plástica se muestra en la figura 1.26. Los radios externos de la esquina deben tener el 150% del espesor de la pared. Para mantener el mismo espesor alrededor de la esquina, el radio de la esquina interior debe de tener el 50% de espesor de la pared sobre la que se levanta. (Kazmar, 2007)



**Figura 1.26 Diseño efectivo de esquinas**

Kazmar, 2007

### Procesamiento de texto

La primera consideración a la hora de añadir texto en una pieza molde es saber si se lo hace en relieve o bajo relieve. El texto en relieve trabaja de mejor manera que el texto en bajo relieve. El bajo relieve implicara que se realice un fresado dentro del molde. Además de esto, las letras en relieve facilitan la lectura y las de bajo relieve en el molde se pueden pulir.

La segunda consideración es el tipo de fuente a utilizar. Se recomienda evitar fuentes curviformes tales como las serif. En su lugar, se deben utilizar fuentes sin marbete (sans-serif), tales como Century Gothic Bold, Arial y Verdana.

Finalmente, el tercer asunto es el tamaño de la fuente. El texto no debe sobresalir de la superficie más de 0.5 mm. El tamaño de la fuente debe ser superior a los 20 puntos y se recomienda utilizar la versión en negrita de la fuente para facilitar el fresado en el molde.

#### Reducción de costos

Para reducir costos unitarios en el proceso de moldeo por inyección, se debe incrementar la cantidad de piezas fabricadas. Esto se debe a que el costo inicial de todo el proceso de diseño y mecanizado se amortiza de acuerdo con el número de pieza fabricadas.

Además del costo unitario, se debe considerar el material de fabricación de la pieza. Varios materiales plásticos comparten las mismas características de resistencia y funcionalidad, sin embargo, sí existe una diferencia en cuanto a la facilidad de moldeo que tienen y eso permite la reducción de costos de la pieza.

A continuación, se presentan nueve sugerencias para poder reducir costos a la hora de fabricar piezas plásticas por moldeo por inyección:

- Eliminar las contrasalidas.
- Eliminar formas innecesarias.
- Minimizar los acabados y aspectos estéticos.
- Diseñar piezas autoensambladas.
- Modificar y reutilizar los moldes.
- Prestar atención al análisis del diseño para fabricación.
- Utilizar moldes de múltiple cavidad o un molde familiar.

### Bisagras

Una bisagra es una sección delgada de plástico rodeada por una sección de mayor espesor que permite a la pieza doblarse de 1 hasta 180 grados. Al doblarse, se crean esfuerzos de tracción. Si la sección es muy delgada, puede que no tenga la resistencia necesaria y se pueda rasgar. Si la sección es muy gruesa, se generarán muchos esfuerzos y la sección se fracturará.

Los materiales recomendados para diseñar piezas plásticas que contengan bisagras son el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP) debido a que ambos tienen un alto índice de flujo del fundido. Esto les permite llenar en su totalidad tanto secciones gruesas como delgadas proveyendo una alta resistencia a la tracción en estas secciones.

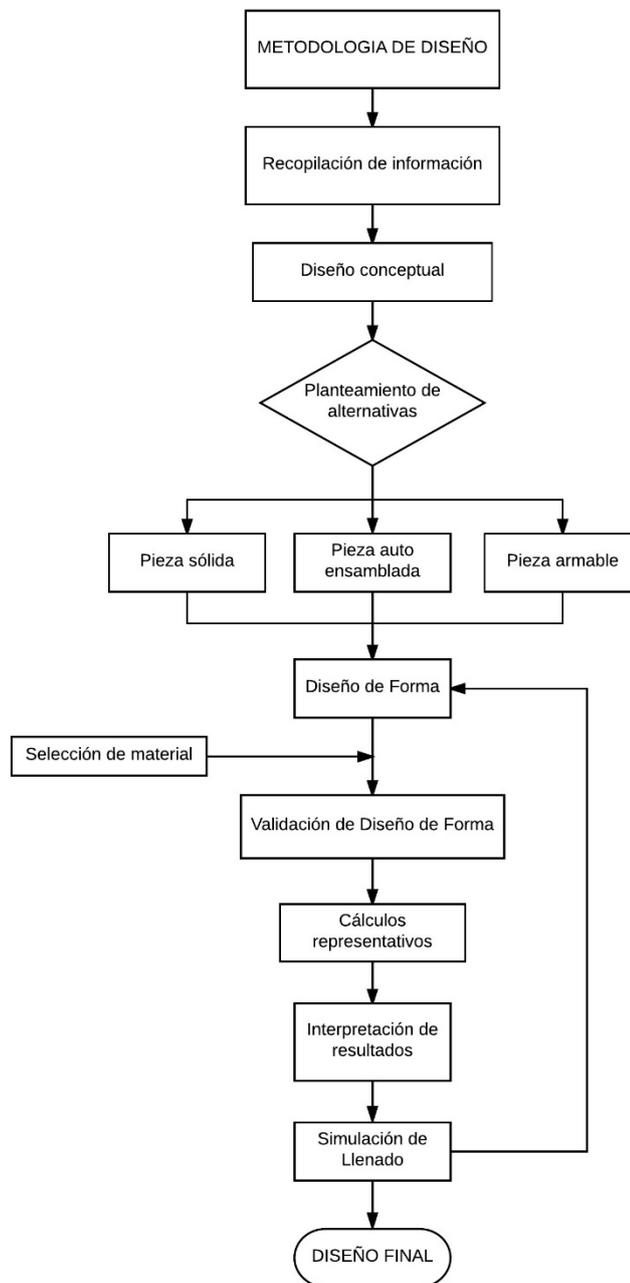
Los lineamientos de diseño para las bisagras son de 0.012 pulgadas de espesor con un espaciado de 0.06 pulgadas y una reducción de 0.008 pulgadas en el lado en el que se pliega la pieza. En el lado opuesto, donde se produce la mayor parte de la tensión de tracción, se recomienda un radio de 0.030 pulgadas para mejorar el flujo del material y reducir la tensión. (Proto Labs, 2017)

La ubicación de la entrada a la cavidad del molde también hace la diferencia entre una bisagra durable y una bisagra que será susceptible a la falla. La correcta ubicación de la entrada a la cavidad reducirá la cantidad de líneas de soldadura asegurando que el material fluya a través de la bisagra a la misma tasa y en la dirección del flujo del material.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el proceso de diseño se presenta a continuación en el siguiente diagrama de bloques.



**Figura 2.1 Metodología de diseño utilizada en el problema**

Fuente: Elaboración propia

## **2.1 Factores de influencia**

Los factores de influencia para el diseño de la pieza maestra se presentan a continuación:

### Costo

El costo de fabricación de la pieza y del molde dependen del diseño, la geometría y material utilizado para la fabricación de la pieza.

### Material

El diseño de todas las piezas plásticas depende del polímero utilizado para su fabricación. Las propiedades y características de la pieza dependerán mucho de las propiedades físicas del polímero.

### Didáctica

La capacidad del diseño final de la pieza de ilustrar los defectos presentes en el proceso de inyección es un factor de consideración ya que se busca que los defectos se aprecien y sean entendidos por el usuario.

### Durabilidad

La pieza debe tener un diseño durable que permita la manipulación por parte del usuario sin sufrir daños a mediano plazo.

### Estética

El diseño de la pieza debe ser atractivo para el usuario. Además, debe contar con buen acabado superficial para ilustrar una pieza de buena calidad.

## **2.2 Alternativas Propuestas**

En esta sección del capítulo se presentan las dos alternativas de diseño propuestas para la construcción de la pieza ilustrativa que contenga los

errores o defectos más comunes obtenidos durante el proceso de inyección de piezas plásticas.

Para cada diseño propuesto, se presentará una breve descripción de este, así como también sus principales fortalezas y desventajas entre cada una. Para realizar la selección definitiva de la solución, se utilizará una matriz de decisiones para comparar cada uno y seleccionar la que obtenga mayor ponderación.

### **2.2.1 Propuesta de diseño de la pieza**

#### Propuesta: Pieza sólida

La primera alternativa de diseño es una pieza sólida. Esta pieza tiene como mayor desventaja que, al ser sólida, no se pueden apreciar los errores por debajo de la superficie de la pieza tales como rechupes o contracciones.

Con respecto a la fabricación, esta pieza tendrá un gran espesor por ser sólida, lo que complicará el proceso de llenado del fundido que tendrán como consecuencias graves problemas de contracción que podrían deformar la pieza.

#### Propuesta: Pieza auto ensamblada

La segunda alternativa de diseño es una pieza auto ensamblada. Esto es una pieza con todas sus caras unidas por una sección delgada de material delgada plegable llamada bisagra viva, donde al juntar cada una de sus caras, se obtiene la forma geométrica deseada.

La principal ventaja de este diseño con respecto a la propuesta presentada anteriormente es que, al ser una pieza armable, ambos lados de las caras son visibles para el usuario. Esto ilustrará al usuario acerca de los errores y soluciones presentes al lado anverso de la pieza.

En cuanto a la fabricación de esta alternativa se presenta dificultades en las bisagras vivas que unen las caras. Este diseño presenta como restricción escoger polietileno o polipropileno para la fabricación de este, debido a que estos dos materiales son los adecuados para la fabricación de las bisagras por su alta resistencia a la tracción.

#### Propuesta: Pieza armable

La última alternativa de diseño es una pieza armable. Esta pieza tendrá cada lado de la figura por separado, donde el usuario tendrá que unir las piezas para obtener la forma final.

La ventaja de esta pieza es que permite visualizar los defectos en ambos lados de las caras. Además de esto, el diseño permite al usuario separar solo la cara con el defecto que se quiera analizar sin tener que armar toda la pieza.

Por lo contrario, esta pieza tiene como desventaja que, al tener las caras separadas, se debe diseñar un sistema de guías y bebederos para el llenado del molde, lo que conlleva a un incremento en el valor de la pieza y el molde además de la posible pérdida de alguna cara de la pieza.

### **2.2.2 Propuestas de la geometría de la pieza**

Para la forma geométrica final de la pieza se han considerado dos alternativas. La primera es un cubo, el cual posee 6 caras. La segunda es una pirámide truncada con base cuadrada, la cual tiene 6 caras, y finalmente, un dodecaedro, el cual posee 12 caras, el doble de la primera y segunda alternativa. Como se requiere ilustrar la mayor cantidad de defectos posibles, la segunda alternativa tiene gran ventaja sobre el resto de las alternativas.

## 2.3 Selección de la Mejor Alternativa

Para realizar la selección de la mejor alternativa de diseño y de la geometría de la pieza, se utilizará una matriz de decisiones. Esta matriz incluye varios parámetros que serán capaces de definir la mejor opción, los cuales serán calificados dentro de un rango que permitirá escoger la alternativa con mayor ponderación. El rango de valores para la calificación de los parámetros va del 1 al 5, siendo el 1 (Muy malo), 2 (Malo), 3 (Regular), 4 (Bueno), 5 (Excelente).

### Diseño final de la pieza

Los parámetros por considerar para la Matriz de Decisión serán los siguientes: Forma, Costos de fabricación, Material, Cantidad de Errores, Tamaño.

Cantidad de errores, con una ponderación del 35%. Este es el parámetro más importante porque lo que se quiere es tratar de ilustrar la mayor cantidad de errores posibles en una sola pieza.

Costo de fabricación, con ponderación del 20% ya que la construcción del equipo dependerá del costo del molde y material utilizado.

La estética con ponderación del 20% debido a que se requiere que la pieza sea lo más llamativa para el usuario para que sirva como herramienta y guía de diseño a la hora de fabricar piezas plásticas por inyección.

Los parámetros de material y tamaño, con una ponderación del 15% y 10% respectivamente. Del material de construcción dependerá el valor final de la pieza, además de las propiedades que tenga la pieza. Finalmente, del tamaño de la pieza dependerá que tan bien se pueden ilustrar los errores, el peso de esta y las dimensiones del molde.

A continuación, en la tabla 2-1 se muestra la matriz decisión para seleccionar la mejor alternativa de diseño.

**Tabla 2.1 Matriz de decisiones – Selección de alternativa de diseño**

	Pieza sólida		Pieza auto ensamblada		Pieza armable		Ponderación
	Calificación	Valor Ponderado	Calificación	Valor Ponderado	Calificación	Valor Ponderado	
<b>Costo de fabricación</b>	2	0,4	4	0,8	2	0,4	20%
<b>Material</b>	4	0,6	4	0,6	3	0,45	15%
<b>Cantidad de errores</b>	2	0,7	4	1,4	4	1,4	35%
<b>Tamaño</b>	4	0,4	4	0,4	4	0,4	10%
<b>Estética</b>	3	0,2	5	1	4	0,8	20%
<b>TOTAL</b>		2,3		4,2		3,45	100%

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la matriz de decisiones, la alternativa de diseño seleccionada es la pieza auto ensamblada. La forma geométrica que tendrá la pieza es también una variable que considerar en el diseño final.

#### Geometría de la pieza

Para la selección de la forma geométrica definitiva, se utilizará otra matriz de decisiones. El rango de valores para calificar será el mismo de la matriz anterior y los parámetros a analizar serán: Cantidad de errores, Estética, Costo y Fabricación.

La cantidad de errores con ponderación de 40% es el parámetro de mayor importancia a la hora de seleccionar la forma geométrica de la pieza debido a que se requiere la mayor cantidad de errores.

La fabricación con ponderación del 30% por la complejidad que tiene el diseño de una pieza con gran cantidad de lados. Entre más lados tenga la pieza, incrementa la complejidad de diseño y fabricación de esta.

La estética con ponderación de 10%. Este parámetro resulta importante en la decisión final ya que se busca que la pieza sea llamativa para el usuario. Finalmente, Costo con ponderación del 20% ya que entre más lados tenga la pieza más costosa será su fabricación por material y por diseño de la pieza.

A continuación, en la tabla 2-2 se muestra la matriz decisión para seleccionar la forma geométrica de la pieza.

**Tabla 2.2 Matriz de decisiones – Selección de forma geométrica**

	Cubo		Pirámide truncada		Dodecaedro		Ponderación
	Calificación	Valor Ponderado	Calificación	Valor Ponderado	Calificación	Valor Ponderado	
<b>Fabricación</b>	3	0,9	2	0,6	3	0,9	30%
<b>Cantidad de errores</b>	2	0,8	2	0,8	5	2	40%
<b>Estética</b>	4	0,4	3	0,3	4	0,4	10%
<b>Costo</b>	4	0,8	3	0,6	3	0,6	20%
<b>TOTAL</b>		2,9		2,3		3,9	100%

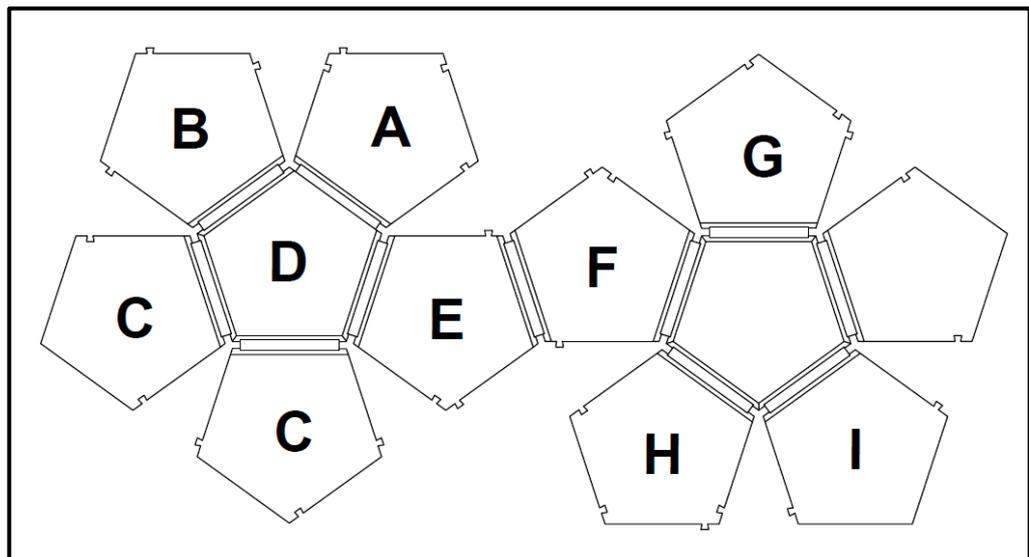
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, luego de la evaluación de las alternativas de solución tanto para el diseño y para la geometría de la pieza, el diseño final será un dodecaedro auto ensamblado.

## 2.4 Diseño de forma

A continuación, se presentan el dibujo esquemático de la pieza en donde se ilustrarán los defectos obtenidos durante el proceso de inyección de piezas plásticas en cada una de las caras de esta.

En la figura 2.2 se muestra la vista frontal de la pieza sin ensamblar con todas las caras disponibles para ilustrar los defectos presentados en inyección.



**Figura 2.2 Vista frontal de la pieza desarmada**

Fuente: Elaboración propia

### 2.4.1 Descripción de los errores mostrados en la pieza

La pieza tiene como objetivo representar los errores más comunes obtenidos durante el proceso de inyección de plásticos. Cada una de las caras de la pieza representa un error obtenido en el proceso de inyección de plásticos. Asimismo, en algunas caras se presentan lineamientos para el diseño de piezas plásticas.

A continuación, se presentan los defectos y lineamientos de diseño representados en el diseño de la pieza:

A) Líneas de soldadura

Las líneas de soldadura son líneas o planos que se presentan en una pieza cuando los frentes del fundido que vienen de diferentes partes del molde se encuentran en un plano.

Las líneas de soldadura son causadas por una inadecuada unión entre dos o más frente de flujos cuando existe una solidificación parcial del fundido. En la pieza se ilustran las líneas de soldadura a través de agujeros que servirán para dividir el frente del flujo. Esto tendrá como resultado la unión inadecuada de los frentes produciendo las líneas de soldadura en la periferia de los agujeros.

B) Rechupes

Los rechupes son pequeñas depresiones que se desarrollan en piezas de espesor muy elevado cuando existe contracción en las partes internas del producto final.

El rechupe en la pieza se presenta a través de una sección con el espesor elevado. De la misma manera se presenta el lineamiento de diseño para secciones con espesor muy elevado, donde se quita el núcleo de la sección previamente ilustrada, para reducir el espesor total de la sección previniendo el rechupe.

C) Transiciones

Cuando se diseñan piezas plásticas, se deben evitar que tengan paredes de espesor variable. Si esto no es posible, las transiciones deben ser graduales para evitar esfuerzos internos que pueden provocar pandeo, reducido rendimiento mecánico y química en servicio.

En una de las caras, se ilustran los cambios de espesor por encima del área de la cara. Estos cambios de espesor van desde una sección escalonada (diseño incorrecto), pasando por una mejora de este diseño que es una transición gradual y finalmente una sección con transición gradual, pero sin núcleo, para evitar la presencia de posibles marcas de hundimiento.

En la otra cara se presentan los cambios de espesor bajo la superficie de la cara. Estos cambios de espesor van desde el 50% hasta el 25% del espesor de la sección en la que se encuentran. La sección con el espesor más delgado (25%) puede presentar problemas de tiros cortos debido a la elevada presión que requiere llenar esta sección.

La longitud de las transiciones debe estar diseñadas con la relación de tres veces la diferencia entre el espesor mayor y menor. (Malloy, 2010)

#### D) Protuberancias

En el diseño de piezas plásticas se requiere en ciertos casos tener protuberancias para sujetar elementos de unión como tornillos o pernos. Estas protuberancias deben seguir los lineamientos de diseño para el espesor de refuerzos para evitar posibles rechupes, vacíos y esfuerzos internos que pueden generar pandeos y una reducción en el rendimiento mecánico de la pieza.

En la pieza se presenta el diseño correcto de grabados en esquinas, en el centro y a los lados. De la misma manera se presentan la manera incorrecta de diseño de los grabados en las mismas ubicaciones.

#### E) Espesor de pared de los refuerzos

Cuando se diseñan partes plásticas que contengan refuerzos, se debe evitar que los refuerzos tengan un espesor muy elevado con respecto al área sobre la cual se levantan para evitar problemas de rechupe sobre la cara contraria.

En la pieza se presentan distintos espesores de pared de los refuerzos que van desde el 50% hasta el 150% del espesor de la sección sobre la cual se levantan para ilustrar el rechupe que se presenta en la cara posterior sobre la cual se levantan los refuerzos.

El espesor ideal del refuerzo no debe de superar el 60% del espesor de la pared sobre la cual se levanta. (Proto Labs, 2017)

#### F) Diseño de texto

Por lo general, los diseñadores de piezas plásticas agregan texto para indicar instrucciones de montaje, número de la pieza, tipo de material o logotipos.

En la pieza se presentan dos líneas de texto. La primera de ellas presenta el correcto diseño para incorporación de texto en una pieza plástica con fuente Arial y tamaño superior a 20 puntos. El segundo texto ilustra el modelo incorrecto con una fuente curviforme (Cambria).

La regla general para incorporar textos es hacerlo en relieve y con fuente sin marbete (sans-serif) como Arial, Verdana y Century Gothic Bold. Asimismo, el texto no debe sobre salir de la superficie más de 0,5 mm y el tamaño de la fuente debe ser de 20 puntos o más de preferencia con la versión en negrita de esta. (Proto Labs, 2017)

#### G) Levas de acción

En el diseño de piezas plásticas existen ocasiones en las cuales el diseño de la pieza necesita una acción lateral para poder retirar la pieza del molde. La pieza presenta dos elementos que necesitan una leva de acción lateral y dos variantes en el diseño de dichos elementos en los cuales no se necesita tener una leva de acción lateral. Evitar las levas de acción lateral reduce los costos de producción del molde.

#### H) Diseño de esquinas

Las piezas que incorporan esquinas cerradas deben ser suavizadas y seguir la regla general de tener radios internos del 50% el espesor de la pared y radios externos con 150% del espesor de la pared. (Proto Labs, 2017)

La pieza presenta cinco esquinas cerradas, de las cuales dos de ellas tienen el diseño correcto según la regla general y tres de ellas presentan fallos en su diseño como esquina con ángulos muy cerrados lo que pueden crear esfuerzos internos de consideración y con radios mal dimensionados lo que puede provocar rechupes en algunos casos por ser muy gruesos.

#### I) Guías de flujo

Las guías de flujo son elementos que sirven para inducir al fundido a fluir en cierta dirección con mayor rapidez para poder llenar zonas de la pieza en que le puede ser más complicado al fundido llegar y así obtener un llenado más uniforme. En la pieza se presenta una cara con guías de flujo para ilustrar el efecto de tener las mismas en una pieza.

## **2.5 Selección de material**

El diseño de la pieza posee bisagras vivas por lo cual la selección del polímero para la fabricación de la pieza se limita a polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP).

Para realizar la selección final del material se utilizará una matriz de decisión considerando los parámetros: Procesabilidad, Costo, Rendimiento a altas temperaturas y Fluidez.

La procesabilidad con ponderación de 25% dado que, debido a la complejidad de la pieza se necesita un polímero con buenas características de procesabilidad para lograr los resultados esperados.

El costo con 20% debido a que el costo del material contribuirá al costo final de producción de la pieza por lo que se buscará que sea lo más bajo posible para reducir el costo final.

Rendimiento a altas temperaturas con ponderación de 20% debido a la complejidad de la pieza se requiere que el polímero tenga un buen rendimiento a altas temperaturas para que puede llenar toda la cavidad del molde sin problema. La categoría debe ser materiales térmicamente estables. Las poliolefinas (PE, PP) son resinas térmicamente estables y permiten largos tiempos de procesamiento sin degradación. El acabado con ponderación del 15% ya que se requiere que la pieza tenga un buen acabado superficial para que sea visualmente de gran calidad.

Finalmente, la fluidez con ponderación del 20% debido a la complejidad de la pieza donde se requiere que el polímero llene la cavidad del molde y no se generen problemas de caída de presión por la viscosidad del polímero.

**Tabla 2.3 Matriz de decisiones – Selección del material de fabricación**

	Polietileno		Polipropileno		Ponderación
	Calificación	Valor Ponderado	Calificación	Valor Ponderado	
<b>Procesabilidad</b>	5	1,25	4	1	25%
<b>Costo</b>	3	0,6	4	0,8	20%
<b>Rendimiento térmico</b>	3	0,6	4	0,8	20%
<b>Fluidez</b>	2	0,4	4	0,8	20%
<b>Acabado</b>	4	0,6	4	0,6	15%
<b>TOTAL</b>		3,45		4	100%

Fuente: Elaboración propia

El material escogido es polipropileno. El polipropileno posee una excelente resistencia a la tensión y un alto valor de resistencia a la flexión debido a su estructura molecular interna regular. La orientación molecular del polipropileno permite ser utilizado en el diseño y fabricación de piezas donde se requiera más de 3 millones de flexiones ideal para el diseño de la pieza.

El polímero por utilizar es el Polipropileno CP 141 (ASTM D4000). Es un copolímero que contiene propileno y etileno con un gran índice de fluidez diseñado especialmente para alta productividad. Esta resina tiene como característica una excelente procesabilidad y buen equilibrio rigidez/impacto. (Braskem, 2009)

Las propiedades de la resina se muestran en la tabla 2.4 que se presenta a continuación:

**Tabla 2.4 Propiedades mecánicas del Polipropileno CP 141**

Propiedades mecánicas	Método ASTM	Valor	Unidad
Densidad	D 792	0,900	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de flexión, secante al 1%	D 790	1,3	GPa
Resistencia a la tracción en el punto de fluencia	D 638	26	MPa
Elongación en el punto de fluencia	D 638	6	%
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	83	-
Resistencia al impacto Izod a 23°C	D 256	90	J/m
Temperatura de deflexión térmica a 0,455 MPa	D 648	110	°C
Temperatura de deflexión térmica a 1,820 MPa	D 648	57	°C

Fuente: Braskem, 2009

## 2.6 Diseño detallado

La ley de Newton de viscosidad asume que la viscosidad no es una función de la velocidad de corte. Cuando un material no obedece esta ley, se lo considera un fluido no newtoniano. Una de los más simples y más comunes modelos no newtonianos es la Ley de Poder, que establece que la viscosidad es una función exponencial de la velocidad de corte y se define como:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{1-n} \quad \text{ec. (1)}$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad (1/s)

$\dot{\gamma}$ : Velocidad de corte (1/s)

$k$ : Viscosidad de Ley de Poder (1/s)

Para el diseño de la pieza se deben considerar las propiedades físicas óptimas del polipropileno para el cálculo de la caída de presión en la pieza, caída de presión en el bebedero, velocidad de inyección del material y fuerza de cierre. Las propiedades de trabajo del polipropileno que se presentan en la tabla 2.5 son las óptimas propiedades de trabajo para el proceso de inyección. Además, esta tabla indica los coeficientes necesarios para la aplicación de la Ley de Poder.

**Tabla 2.5 Propiedades de operación del polipropileno**

Propiedad	Valor
Temperatura media de fundido (°C)	220
Temperatura media del molde (°C)	50
Viscosidad de la Ley de Poder (Pa s <sup>n</sup> )	5300
Índice de la Ley de Poder, n	0.3083
Conductividad térmica (W/m°C)	0.184

Fuente: Autodesk Moldflow Plastics Labs, 2012

### 2.6.1 Caída de presión en la pieza

El análisis de caída de presión en la pieza es unidimensional por lo que las características del diseño (refuerzos, variaciones de espesor, texto) son obviadas para este análisis. Estas características tienden a llenarse si son pequeñas comparadas con el flujo principal.

Para calcular con mayor precisión la presión de llenado en piezas complejas es necesario separar la pieza en una serie de piezas más sencillas. El flujo en cada sección puede ser analizada de manera individual utilizando la Ley de Poder para la caída de presión y velocidad del flujo.

Para la pieza se considerará cada una de las caras con forma pentagonal (12 en total) y las bisagras en forma rectangular (11 en total) con espesores de 2 mm y 0.5 mm, respectivamente. Además, se asumirá un punto de inyección en el centroide de cada figura con lo que obtiene una longitud de 40.6 mm para los pentágonos y 21.6 mm para las bisagras.

#### Caras pentagonales

Para conocer la caída de presión dentro de las caras pentagonales se debe considerar la velocidad de inyección del material. Para un fluido no newtoniano, esta ecuación está dada por:

$$\bar{v} = \left[ \frac{(T_{melt} - T_{wall}) \kappa 2^{5-n} (4-n)(6-n)}{k H^{5-n}} \right]^{\frac{1}{3-n}} \cdot \frac{H^2}{4 \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \quad \text{ec. (2)}$$

Donde:

$\bar{v}$ : Velocidad media de inyección [m/s]

$T_{melt}$ : Temperatura del fundido, 220 [°C]

$T_{wall}$ : Temperatura de la pared del molde, 50 [°C]

$\kappa$ : Conductividad térmica, 0.184 [W/m°C]

$n$ : Índice de la ley de fuerza, 0.3083

$k$ : Viscosidad de la Ley de Poder, 5300 [Pa s]

$H$ : Espesor de la pieza, 0.002 [m]

Reemplazando los valores indicados para la ecuación (2) se obtiene:

$$\bar{v} = 0.0184 \text{ m/s}$$

La caída de presión a lo largo de cada cara estará dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_F = \frac{2 k L}{H} \left[ \frac{2 \left(1 + \frac{1}{n}\right) \bar{v}}{H} \right]^n \quad \text{ec. (3)}$$

Donde:

$\Delta P$ : Caída de presión a lo largo de las caras [Pa]

$k$ : Viscosidad Ley de Poder, 5300 [Pa s]

$L$ : Longitud de la cara, 0.0406 [m]

$H$ : Espesor de la pieza, 0.002 [m]

$\bar{v}$ : Velocidad media, 0.0184 [m/s]

$n$ : Índice de la ley de fuerza, 0.3083

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (3) y debido a que se tienen 12 caras pentagonales en la pieza, se tiene:

$$\Delta P_F = 0.825 \text{ MPa} \times 12 = 9.9 \text{ [MPa]}$$

### Bisagras

Para conocer la caída de presión en las bisagras se debe considerar la velocidad de inyección del material. Para un fluido no newtoniano, esta ecuación está dada por:

$$\bar{v} = \left[ \frac{(T_{melt} - T_{wall}) \kappa 2^{5-n} (4-n)(6-n)}{k H^{5-n}} \right]^{\frac{1}{3-n}} \cdot \frac{H^2}{4 \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \quad \text{ec. (2)}$$

Donde:

$\bar{v}$ : Velocidad media de inyección [m/s]

$T_{melt}$ : Temperatura del fundido, 220 [°C]

$T_{wall}$ : Temperatura de la pared del molde, 50 [°C]

$\kappa$ : Conductividad térmica, 0.184 [W/m°C]

$n$ : Índice de la ley de fuerza, 0.3083

$k$ : Viscosidad de la Ley de Poder, 5300 [Pa s]

$H$ : Espesor de la pieza, 0.0005 [m]

Reemplazando los valores indicados para la ecuación (2) se obtiene:

$$\bar{v} = 0.0129 \text{ m/s}$$

La caída de presión a lo largo de cada bisagra estará dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_H = \frac{2 k L}{H} \left[ \frac{2 \left(1 + \frac{1}{n}\right) \bar{v}}{H} \right]^n \quad \text{ec. (3)}$$

Donde:

$\Delta P_H$ : Caída de presión a lo largo de la pieza [Pa]

$k$ : Viscosidad Ley de Poder, 5300 [Pa s]

$L$ : Longitud total de la bisagra, 0.0216 [m]

$H$ : Espesor de la pieza, 0.0005 [m]

$\bar{v}$ : Velocidad media, 0.0184 [m/s]

$n$ : Índice de la ley de fuerza, 0.3083

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (3) y debido a que se tienen 11 bisagras en la pieza, se tiene:

$$\Delta P_H = 2.41 \text{ MPa} \times 11 = 26.5 \text{ [MPa]}$$

La caída de presión total a lo largo de la pieza estará dada por la suma de las caídas de presión en las caras y en las bisagras.

$$\Delta P_{pieza} = \Delta P_F + \Delta P_H = 9.9 + 26.5 = 36.4 \text{ [MPa]}$$

### 2.6.2 Determinación de fuerza de cierre

La fuerza de cierre está definida como la cantidad de fuerza requerida para mantener el molde cerrado durante la operación.

La fuerza de cierre,  $F_{clamp}$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$F_{clamp} = P_{cavity} \cdot A_{cavity\_projected} \quad \text{ec. (4)}$$

Donde:

$F_{clamp}$ : Fuerza de cierre [kN]

$P_{cavity}$ : Presión en la cavidad, 36.4 [MPa]

$A_{cavity\_projected}$ : Área proyectada, 0.0533 [m<sup>2</sup>]

Reemplazando los valores en la ecuación (4) se obtiene:

$$F_{clamp} = 1\,940 \text{ [kN]} = 197.8 \text{ [tonne]}$$

### 2.6.3 Contracción volumétrica de la pieza

Para el cálculo de la contracción volumétrica del material, se necesita primero determinar la temperatura de transición. Para esto se asume la presión de empaquetamiento como el 80% de la presión total en la pieza, siendo así la presión de empaquetamiento 29.12 MPa.

La temperatura de transición está dada por la expresión:

$$T_t(P) = b_5 + b_6P \quad \text{ec. (5)}$$

Donde:

$T_t(P)$ : Temperatura de transición a la presión de empaquetamiento, [K]

$b_5$ : Temperatura de transición a presión cero, 443.15 [K]

$b_6$ : Tasa de cambio de la temperatura de transición con respecto a la presión, 1.12E-07 [K/Pa]

$P$ : Presión de empaquetamiento, 29.12 [MPa]

Sustituyendo los valores en la ec. (5) se obtiene:

$$T_t(29.12 \text{ MPa}) = 446.41 \text{ K} = 173.41 \text{ °C}$$

La temperatura de flujo estacionario de 176 °C está por encima de la temperatura de transición de 173.41 °C por lo que se deben usar los coeficientes de estado líquido. Para temperaturas menores a la temperatura de transición, el volumen específico de referencia está dado por la siguiente expresión:

$$v_0 = b_{1,m} + b_{2,m}(T - b_5) \quad \text{ec. (6)}$$

Donde:

$v_0$ : Volumen específico de referencia, [m<sup>3</sup>/kg]

$b_{1,m}$ : Coeficiente de estado líquido, 0.001304 [m<sup>3</sup>/kg]

$b_{2,m}$ : Coeficiente de estado líquido, 1.037E-06 [m<sup>3</sup>/kg K]

$T$ : Temperatura de flujo estacionario, 449 [K]

$b_5$ : Temperatura de transición a presión cero, 443.15 [K]

Sustituyendo los valores en la ecuación (6) se obtiene:

$$v_0 = 1.31 \times 10^{-3} \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Para temperaturas menores a la temperatura de transición, la compresibilidad está dada por la expresión:

$$B(T) = b_{3,m} \cdot \exp(-b_{4,m}(T - b_5)) \quad \text{ec. (7)}$$

Donde:

$b_{3,m}$ : Coeficiente de estado líquido, 8.48518E+07 [Pa]

$b_{4,m}$ : Coeficiente de estado líquido, 0.00635 [1/K]

$T$ : Temperatura de flujo estacionario, 449 [K]

$b_5$ : Temperatura de transición a presión cero, 443.15 [K]

Sustituyendo los valores en la ecuación (7) se obtiene:

$$B(449 K) = 81.75 \times 10^6 [Pa]$$

El volumen específico al final de la etapa de empaquetamiento, a la temperatura de flujo estacionario y presión de empaquetamiento, está dado por la expresión:

$$v(T, P) = v_0(T) \left[ 1 - 0.0894 \cdot \ln \left( 1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] \quad \text{ec. (8)}$$

Donde:

$v_0$ : Volumen específico de referencia, 1.31E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

$P$ : Presión de empaquetamiento, 29.12 [MPa]

$B$ : Compresibilidad del material, 81.75 [MPa]

Sustituyendo los valores en la ecuación (8) se obtiene:

$$v(176 \text{ }^\circ\text{C}, 35.68 \text{ MPa}) = 1.27 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

Luego del proceso de moldeo, la pieza se asume a temperatura ambiente de 20 °C y a presión de 0 MPa. Utilizando los coeficientes para estado sólido, el volumen referencia está dado por la expresión:

$$v_0 = b_{1,s} + b_{2,s}(T - b_5) \quad \text{ec. (9)}$$

Donde:

$v_0$ : Volumen específico de referencia, [m<sup>3</sup>/kg]

$b_{1,s}$ : Coeficiente de estado sólido, 1.17E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

$b_{2,s}$ : Coeficiente de estado sólido, 3.631E-07 [m<sup>3</sup>/kg K]

$T$ : Temperatura ambiente, 293 [K]

$b_5$ : Temperatura de transición a presión cero, 443.15 [K]

Sustituyendo estos valores en la ecuación (9) se obtiene:

$$v_0 = 1.11 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

El volumen específico al final del proceso, a temperatura ambiente y presión de 0 MPa, está dado por la expresión:

$$v(T, P) = v_0(T) \left[ 1 - 0.0894 \cdot \ln \left( 1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] \quad \text{ec. (8)}$$

Donde:

$v_0$ : Volumen específico de referencia, 1.11E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

$P$ : Presión de empaquetamiento, 0 [MPa]

$B$ : Compresibilidad del material, 81.75 [MPa]

Sustituyendo los valores en la ecuación (8) se obtiene:

$$v(20\text{ °C}, 0\text{ MPa}) = 1.11 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

La variación absoluta de volumen de la pieza se puede calcular como el cambio entre el volumen específico al final de la etapa de empaquetamiento y el volumen final de la pieza. Esta variación está dada por la expresión:

$$\Delta v = v(T_{no\_flow}, P_{pack}) - v(T_{end\_use}, P_{end\_use}) \quad \text{ec. (10)}$$

Donde:

$v(T_{no\_flow}, P_{pack})$ : Volumen específico a la temperatura estacionaria y presión de empaquetamiento, 1.27E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

$v(T_{end\_use}, P_{end\_use})$ : Volumen específico a la temperatura y presión final de uso de la pieza, 1.11E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

Sustituyendo los valores en la ecuación (10) se obtiene:

$$\Delta v = 0.00016 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

La relación del volumen específico está dada por la expresión:

$$r_v = \frac{v(T_{end\_use}, P_{end\_use})}{v(T_{no\_flow}, P_{pack})} \quad \text{ec. (11)}$$

Donde:

$r_v$ : Relación de volúmenes específicos

$v(T_{no\_flow}, P_{pack})$ : Volumen específico a la temperatura estacionaria y presión de empaquetamiento, 1.27E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

$v(T_{end\_use}, P_{end\_use})$ : Volumen específico a la temperatura y presión final de uso de la pieza, 1.11E-03 [m<sup>3</sup>/kg]

Sustituyendo los valores en la ecuación (11) se obtiene:

$$r_v = 0.874$$

El cambio relativo en la contracción volumétrica es alrededor del 12.6 %.

#### 2.6.4 Contracción isotrópica lineal

La contracción volumétrica corresponde a la contracción en las tres dimensiones espaciales de la pieza. Si un material exhibe las mismas propiedades en la misma dirección, se le llama isotrópica.

La contracción lineal está dada por la expresión:

$$s = 1 - \sqrt[3]{r_v} \quad \text{ec. (12)}$$

Donde:

$s$ : Contracción lineal, [%]

$r_v$ : Relación de volúmenes específicos, 0.87

Sustituyendo los valores en la ecuación (12) se obtiene:

$$s = 1 - \sqrt[3]{0.87} = 1 - 0.955 = 0.045 = 4.5 \%$$

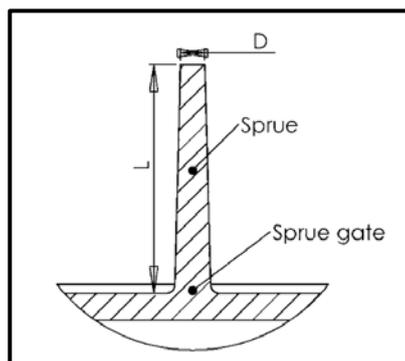
### 2.6.5 Diseño de la entrada a la cavidad del molde

El bebedero es usado comúnmente en moldes de cavidad simple. El bebedero es la interfaz entre la parte inferior del mismo y la parte superior de la pieza.

Dadas las largas dimensiones de los diseños de los bebederos, las caídas de presión y tasa de corte son relativamente bajas tanto que se pueden alcanzar altas velocidades de flujo hacia la cavidad.

La desventaja de este tipo de entrada es la dificultad de remover la entrada debido a su diámetro. Mientras que el operador puede remover manualmente la entrada en muchas aplicaciones con una cortadora, se requieren cortadoras eléctricas en muchas aplicaciones debido a su gran diámetro.

Para ilustrar de mejor manera el diseño del bebedero se muestra en la figura 2.3 el diseño de este.



**Figura 2.3 Diseño del bebedero**

Fuente: Kazmar, 2007

### Cálculo del flujo volumétrico

Para el cálculo del flujo volumétrico, se utilizará la velocidad de inyección media calculada previamente y el área transversal más delgada del bebedero.

Para calcular el área del bebedero, se va a considerar como diámetro del bebedero el mismo espesor de la sección sobre la cual se va a ubicar sobre la pieza (2 mm).

El área transversal del bebedero está dada por la ecuación:

$$A_{trans} = \pi \frac{D^2}{4} \quad \text{ec. (13)}$$

Donde:

$D$ : Diámetro del bebedero, 0.002 [m]

Sustituyendo los valores en la ecuación (13) se obtiene:

$$A_{trans} = 3.14 \times 10^{-6} [m^2]$$

El flujo volumétrico estará dado por la expresión:

$$\dot{V} = A_{trans} \cdot \bar{v} \quad \text{ec. (14)}$$

Donde:

$\dot{V}$ : Flujo volumétrico, [m<sup>3</sup>/s]

$A_{trans}$ : Área transversal del bebedero, 3.14E-06 [m<sup>2</sup>]

$\bar{v}$ : Velocidad media de inyección, 0.0184 [m/s]

Sustituyendo los valores en la ecuación (14) se obtiene:

$$\dot{V} = 5.78 \times 10^{-8} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

#### Cálculo de la velocidad de corte

Según la Ley de Poder, la velocidad de corte está dada por la expresión:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\dot{V}}{\pi R^3} \quad \text{ec. (15)}$$

Donde:

$\dot{\gamma}$ : Velocidad de corte [1/s]

$n$ : Índice de Ley de Poder, 0.3038

$\dot{V}$ : Flujo volumétrico, 5.78E-08 [m<sup>3</sup>/s]

$R$ : Radio del bebedero, 0.001 [m]

Sustituyendo los valores en la ecuación (15) se obtiene:

$$\dot{\gamma} = 194.71 \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Este valor se encuentra muy por debajo del valor máximo de la velocidad de corte para el polipropileno.

#### Cálculo de la caída de presión

Si la velocidad de corte se encuentra por debajo de su valor máximo permitido, la caída de presión deberá ser aceptable también. Sin embargo, la caída de presión a través de la entrada debe ser calculada para asegurar una presión de inyección adecuada para llenar la cavidad del molde.

De acuerdo con Ley de Poder, la caída de presión para el bebedero cilíndrico está expresada por:

$$\Delta P = \frac{2 k L}{R} \left[ \frac{\left(3 + \frac{1}{n}\right) \dot{V}}{\pi R^3} \right]^n \quad \text{ec. (16)}$$

Donde:

$\Delta P$ : Caída de presión en el bebedero [Pa]

$k$ : Viscosidad Ley de Poder, 5300 [Pa s]

$L$ : Longitud total del bebedero, 0.075 [m]

$R$ : Radio del bebedero, 0.001 [m]

$n$ : Índice de la ley de fuerza, 0.3038

$\dot{V}$ : Flujo volumétrico, 5.78E-08 [m<sup>3</sup>/s]

Sustituyendo los valores en la ecuación (16) se obtiene:

$$\Delta P = 3.37 [MPa]$$

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

El diseño detallado y los resultados presentados en el capítulo anterior serán validados utilizando el método de elementos finitos que se describe en la siguiente sección.

### 3.1 Método de Elementos Finitos

El uso de análisis estructural lineal y no lineal asistido por computadora ha mejorado tanto la precisión como la interpretación y velocidad en que se pueden completar evaluaciones de diseño.

En el Análisis de Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) un problema complejo se divide en una serie de problemas menores interrelacionados que son solucionados con la ayuda de una computadora. Estas poderosas técnicas fueron desarrolladas décadas atrás para estructuras metálicas y son ahora comúnmente utilizadas para analizar el comportamiento estructural y térmico de piezas plásticas.

Los resultados del análisis de elementos finitos pueden alertar al diseñador sobre potenciales áreas sometidas a grandes esfuerzos y permite optimizar variables como el radio de esquinas, espesores de pared o ubicación de pernos. El análisis de elementos finitos no elimina la necesidad de un prototipo, pero complementa el procedimiento de prototipado brindando una indicación temprana de las áreas problemáticas.

La geometría de la pieza plástica es modelada utilizando software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés), donde luego se crea una malla de elementos finitos conformada por una serie de elementos interconectados en vértices o nodos. Las densidades de la malla pueden ser incrementadas en áreas problemáticas como esquinas donde se desarrollan

concentradores de esfuerzos. El software para el análisis de elementos finitos para la pieza será Autodesk Moldflow Adviser.

#### Procedimiento de simulación utilizando Autodesk Moldflow Adviser

- i. Importación del modelo: Para empezar la simulación, se importa el modelo diseñado con formato IPT desde el software Autodesk Inventor.
- ii. Selección del tipo de mallado: Una vez importado el modelo, el software solicita al usuario la selección del tipo de mallado a utilizar para la simulación. Al ser una pieza con espesor de pared delgada en su gran mayoría, el software aconseja trabajar con su malla predeterminada Dual Domain Mesh (Malla de Doble Dominio).
- iii. Selección de material: En la ventana del Asistente de Análisis, se selecciona el material de fabricación del modelo de la biblioteca que proporciona el software. El material seleccionado para este modelo es un Polipropileno Genérico no Reforzado.
- iv. Determinación del Punto de Inyección: El punto de inyección se puede determinar de manera manual o utilizando el Asistente de Análisis. El Asistente provee la ubicación de inyección donde existirá la menor caída de presión en el modelo. Dentro de la ventana del Asistente, se selecciona la secuencia de análisis GATE, se determina la resolución de este (Nivel 3) y se procede a ejecutar el análisis. Finalmente, se selecciona la ubicación determinada por el Asistente para continuar con el proceso.
- v. Determinación de la secuencia de análisis: En la ventana del Asistente de Análisis, se selecciona la secuencia de análisis FILL+PACK, WARP, SINK MARK y COOLING QUALITY. Luego de esto se determina la más

alta resolución para el análisis (nivel 3) y se procede a ejecutar la simulación y posterior presentación de los resultados obtenidos.

### **3.2 Análisis de Resultados**

En la siguiente sección se presentan todos los resultados de cada secuencia que fueron obtenidos a través de la simulación utilizando el Software Autodesk Moldflow Adviser.

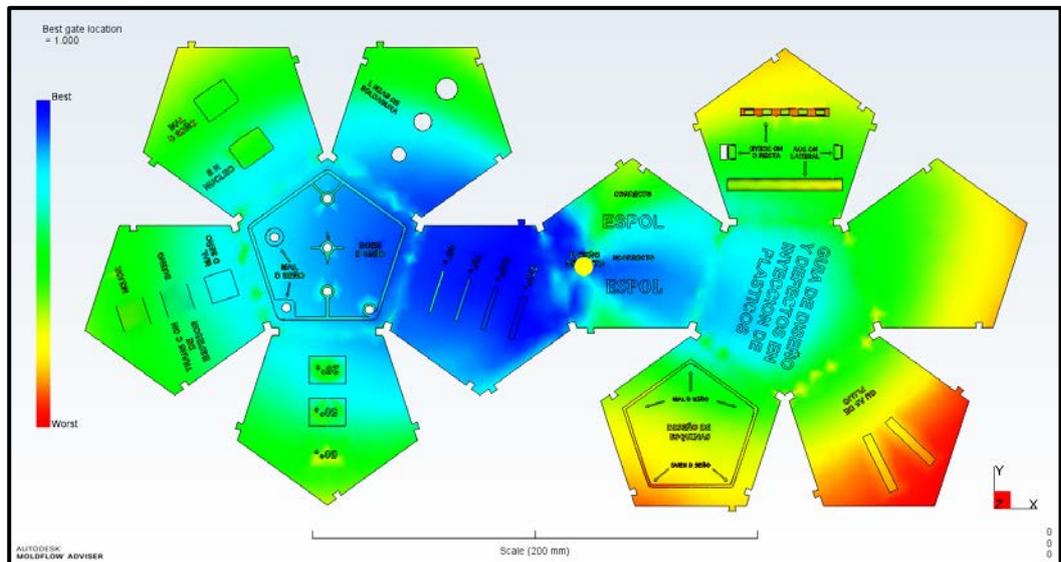
El modelo CAD fue diseñado utilizando el software Autodesk Inventor 2018 para luego ser importado al software de elementos finitos. Los resultados más relevantes que son presentados en este análisis son: Tiempo de llenado, Presión de inyección, Caída de Presión, Trampas de aire, Líneas de soldadura, Orientación en la superficie, Deflexión total, Pandeo, Estimación de marcas de hundimiento y Contracción volumétrica.

#### **3.2.1 Ubicación del punto de inyección**

El análisis de la ubicación del punto de inyección evalúa cada punto del modelo para seleccionar la ubicación más idónea para ubicar el punto de inyección. Este análisis minimiza la resistencia del flujo y selecciona el punto donde la caída de presión es menor para determinar la mejor ubicación del punto de inyección.

La figura 3.1 muestra las regiones más convenientes para ubicar el punto de inyección en color azul y las regiones menos convenientes para ubicar el punto de inyección en color rojo. El círculo de color amarillo representa la mejor ubicación del punto de inyección determinada por el software y donde finalmente se ubicó el punto de inyección para la posterior secuencia de análisis.

Como se puede observar en la figura 3.1 el punto de inyección está ubicada cerca del centroide de la pieza. Esto permite una mejor distribución de la presión y un llenado más uniforme de la pieza.



**Figura 3.1 Ubicación del punto de inyección en el modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

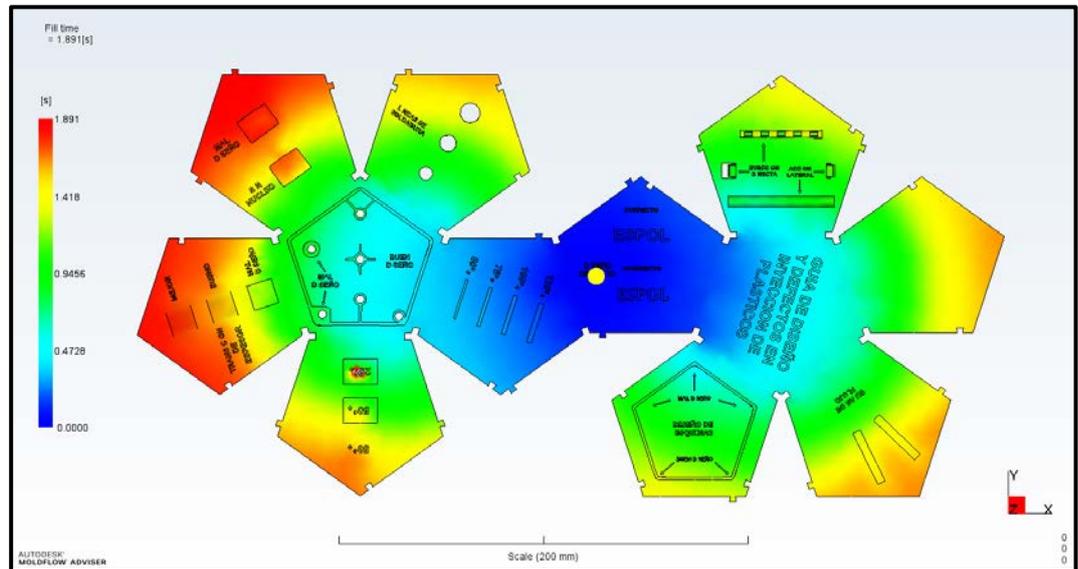
### 3.2.2 Tiempo de Llenado

El resultado del tiempo de llenado muestra la posición del frente del flujo en intervalos regulares y el tiempo que le toma al fundido alcanzar toda la cavidad del molde.

La figura 3.2 muestra el tiempo total que le toma al fundido llenar toda la cavidad de la pieza (1.89 s). El patrón de llenado es uniforme hasta llegar hasta las caras más alejadas de la pieza, donde se puede observar que el lado izquierdo de la pieza es la última en llenarse. Esto se debe a que la caída de presión en el lado izquierdo de la pieza es mayor que el lado derecho por lo que al flujo le tomará más tiempo llenar esta sección.

Un patrón de llenado no uniforme puede provocar problemas en la pieza debido a un enfriamiento no uniforme que puede producir tiros cortos,

pandeo, entre otros problemas. El patrón de llenado obtenido en la pieza es el mejor que se puede conseguir debido a la complejidad de la pieza. La figura 3.2 muestra el patrón de llenado obtenido con el punto de inyección seleccionado.



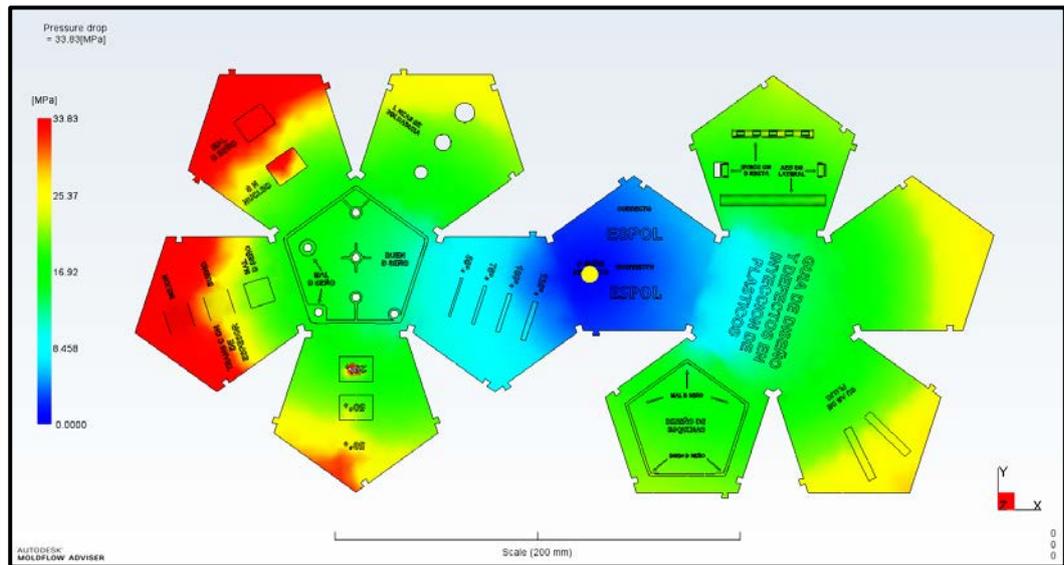
**Figura 3.2 Tiempo de llenado del modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

### 3.2.3 Caída de presión

La caída de presión utiliza un rango de colores para indicar las regiones de mayor caída de presión hasta la región de menor caída de presión. Este resultado indica cuanta presión se necesita para llenar las diferentes áreas de la pieza.

La figura 3.3 muestra la caída de presión obtenida en el modelo. Cada color en el modelo representa la caída de presión desde el punto de inyección hasta dicha sección en el moldeo al momento de que se llena esa pieza.



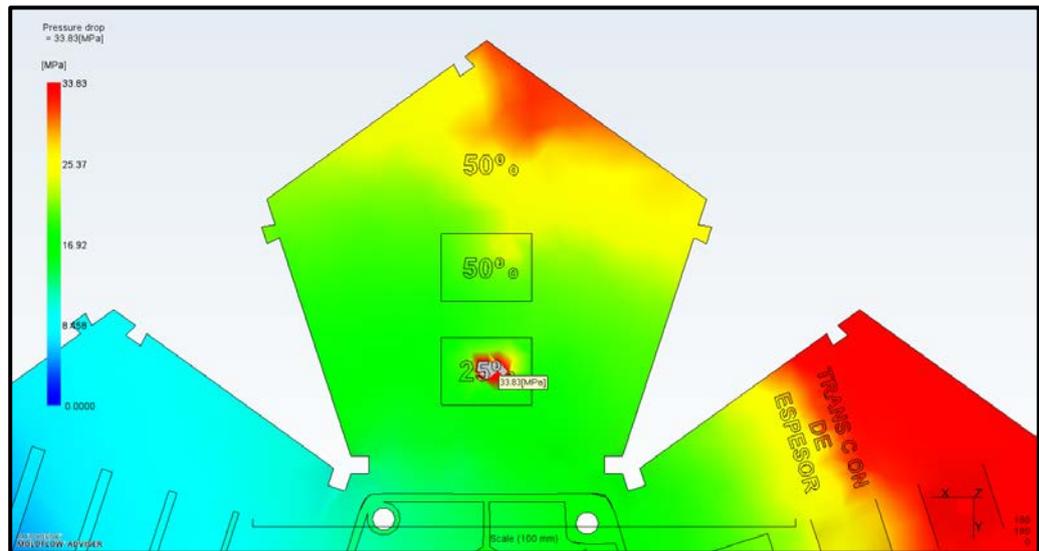
**Figura 3.3 Caída de presión en el modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

La mayor caída de presión en el modelo es de 33.83 MPa. El lado izquierdo del modelo tendrá la mayor caída de presión y es por esto es por lo que esta región tomará mayor tiempo llenarse que el lado derecho del modelo. Debido a la diferencia de presiones, el patrón de llenado presentado en la sección 3.2.1 no es el ideal.

En la figura 3.3 también se puede observar que en una de las caras donde se ilustran cambios de espesor, donde la sección que varía el espesor al 25% del espesor nominal de la pieza (2 mm), tiene una caída de presión de 33.83 MPa al finalizar la etapa de llenado. Este resultado específico se muestra en la figura 3.4.

El cambio drástico en el espesor del modelo (2 mm a 0.5 mm) sin una adecuada transición de espesor, produce que la caída de presión se eleve de tal manera que el fundido no llene de manera correcta el modelo en esta sección.



**Figura 3.4 Caída de presión en la sección de cambio de espesor**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

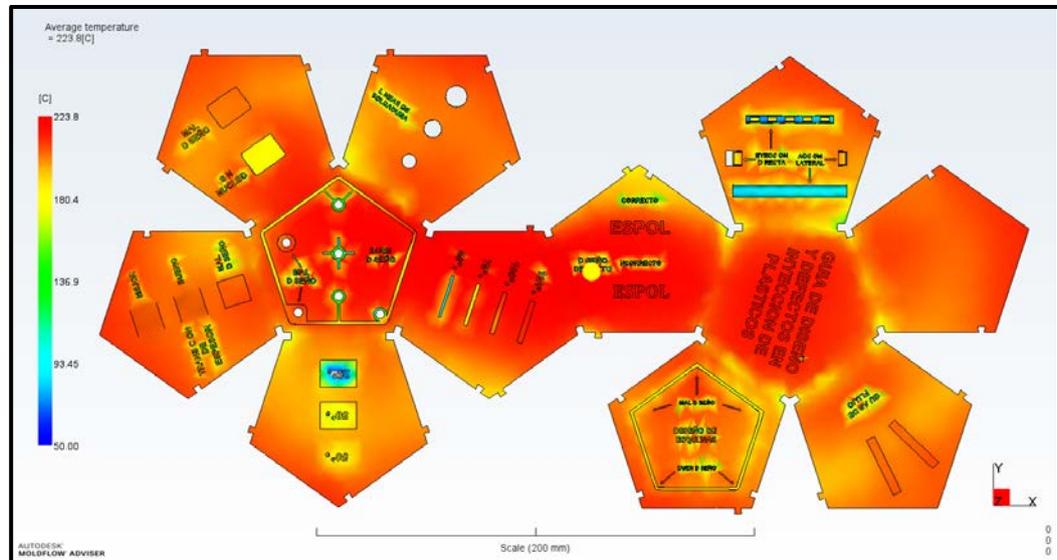
### 3.2.4 Temperatura promedio

El resultado de la temperatura promedio muestra el promedio de la temperatura aparente a través del espesor de la pieza al finalizar la etapa de llenado. La temperatura del fundido del polímero cambia no solamente con el tiempo y la ubicación, sino también con el espesor durante todo el ciclo de inyección.

La figura 3.5 muestra la temperatura promedio del modelo. El resultado de la temperatura promedio fue de 223.8 °C. Como se observa en la figura 3.5, esta temperatura se mantiene en la mayor parte del modelo excepto en una de las caras donde se ilustran cambios de espesor, donde la sección que varía el espesor al 25% del espesor nominal de la pieza (2 mm), tiene una temperatura de 68.97 °C al finalizar la etapa de llenado.

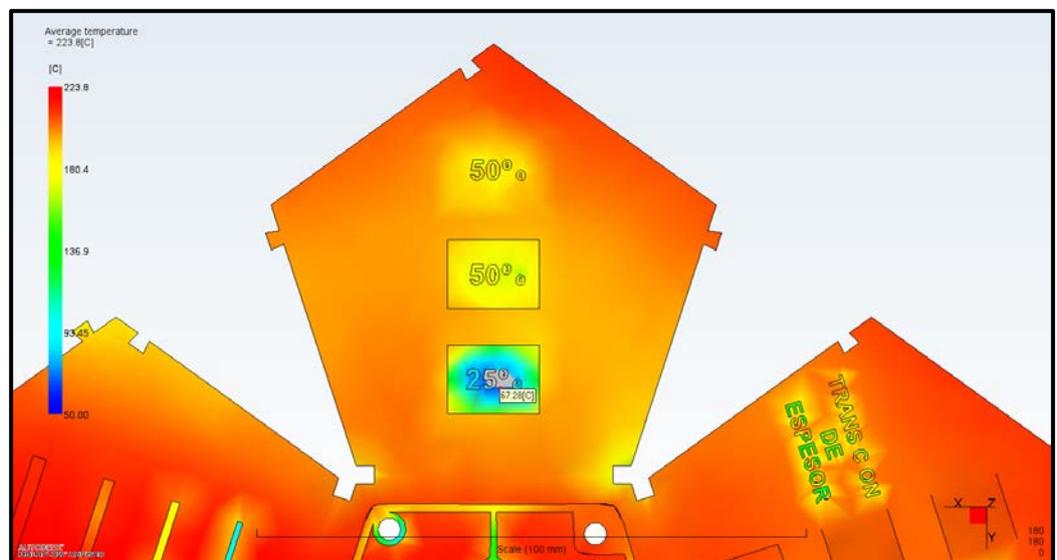
Este resultado específico se muestra en la figura 3.6. La baja temperatura obtenida en esta sección tendrá como consecuencia un enfriamiento

premature de la sección, lo que conllevará a que esta sección del modelo no se llene de manera adecuada provocando tiros cortos.



**Figura 3.5 Temperatura promedio en el modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser



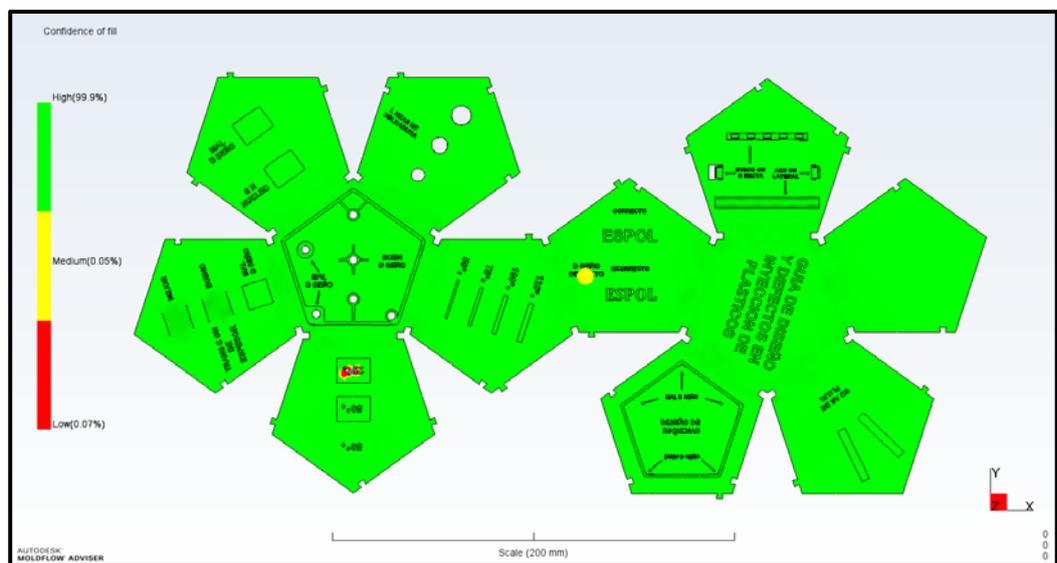
**Figura 3.6 Temperatura promedio en la sección de cambio de espesor**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

### 3.2.5 Confianza de llenado

La confianza de llenado muestra la probabilidad que el material llena una región dentro de la cavidad del molde bajo condiciones ideales de moldeo por inyección. Este resultado es derivado de los resultados de presión y temperatura.

La figura 3.7 muestra la confianza de llenado del modelo. Como se puede observar la confianza de llenado es elevada (99.9 %) para la mayor parte del modelo, con excepción en la cara donde se encuentra el cambio de espesor donde se reduce el 25 % del espesor nominal del modelo. En esta sección la confianza de llenado disminuye al 0.07% por lo que es muy improbable que la pieza se llene en esta sección.



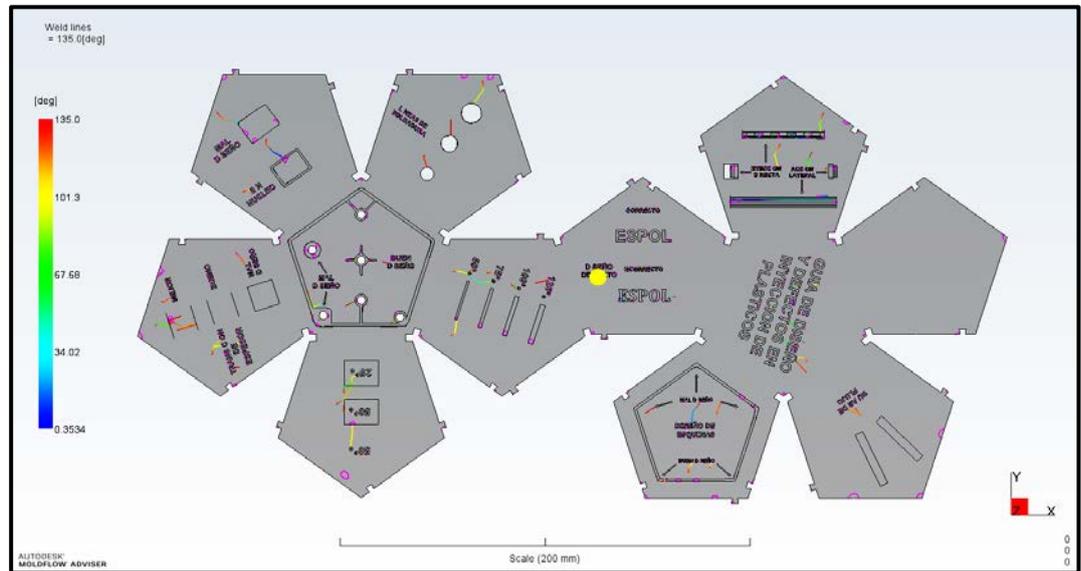
**Figura 3.7 Confianza de llenado del modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

La muy baja probabilidad de que la sección que contiene la reducción del espesor se llene, se debe a la alta caída de presión y temperatura promedio al finalizar la etapa de llenado, como se presentó en las secciones previas. La combinación de estos resultados hace posible la predicción del tiro corto en esta sección del modelo.



Las líneas de soldadura pueden causar problemas estructurales y pueden hacer a la pieza visualmente inaceptable, pero son inevitables cuando el flujo se divide y vuelve a juntarse alrededor de un agujero. La figura 3.9 muestra las líneas de soldadura que se obtuvieron en el modelo.

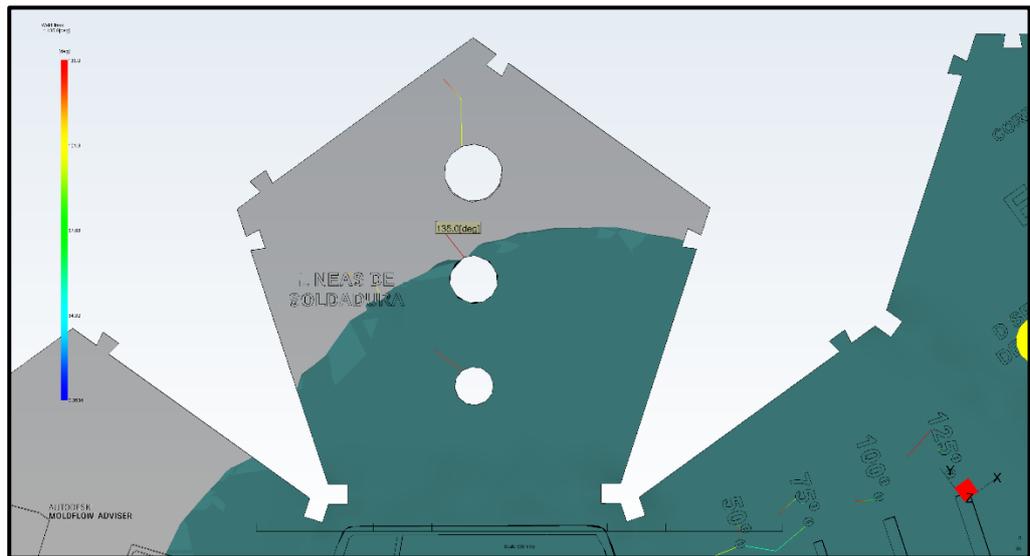


**Figura 3.9 Líneas de soldadura en el modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

Como se puede observar en la figura 3.9, se presenta la formación de líneas de soldadura en la cara diseñada para este fin. Los tres agujeros obligan al frente del flujo a separarse al inicio de cada uno de ellos y luego volver a encontrarse al final de estos. La figura 3.10 muestra con mayor detalle este defecto en la cara propuesta, donde se observa que las líneas de soldadura tienen un ángulo de  $135^\circ$  en esta sección.

Las líneas de soldadura no solo se presentan con la inclusión de agujeros en la cara diseñada para la ilustración de este defecto, sino también son notorias en otras regiones del modelo donde el diseño de este produce una separación del flujo y su posterior unión formando las líneas de soldadura.



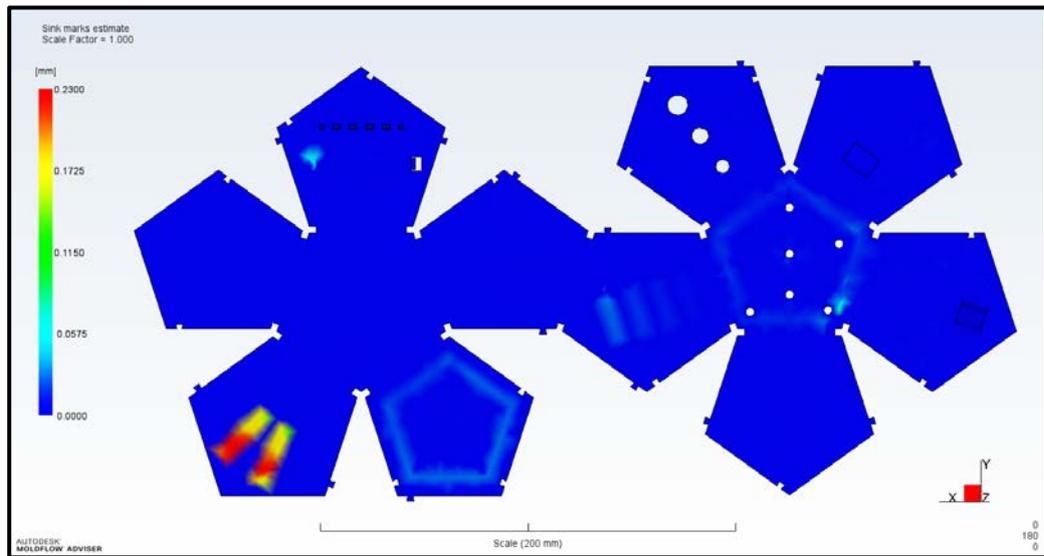
**Figura 3.10 Líneas de soldadura en la cara destinada a presentar este defecto**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

### 3.2.8 Estimación de marcas de hundimiento o rechupes

La estimación de las marcas de hundimiento muestra la profundidad de estas en la pieza, y muestra una leyenda para detallar la diferencia entre estas. Estos resultados indican la presencia y ubicación de las marcas de hundimiento causadas por secciones de gran espesor como refuerzos o filetes internos, como se muestra en la figura 3.11.

Las guías de flujo presentadas en una de las caras significaron la presencia de las marcas de hundimiento más significativas del modelo con una profundidad de 0.23 mm debido a que estas tienen 4.5 mm de altura sobre una cara de 1.4 mm de espesor, es decir, más de 3 veces el espesor de la cara sobre la cual se levantó, cuando el máximo recomendado para evitar el rechupe debe ser de entre el 40% y 60% del espesor nominal de la pared sobre la cual se levanta.



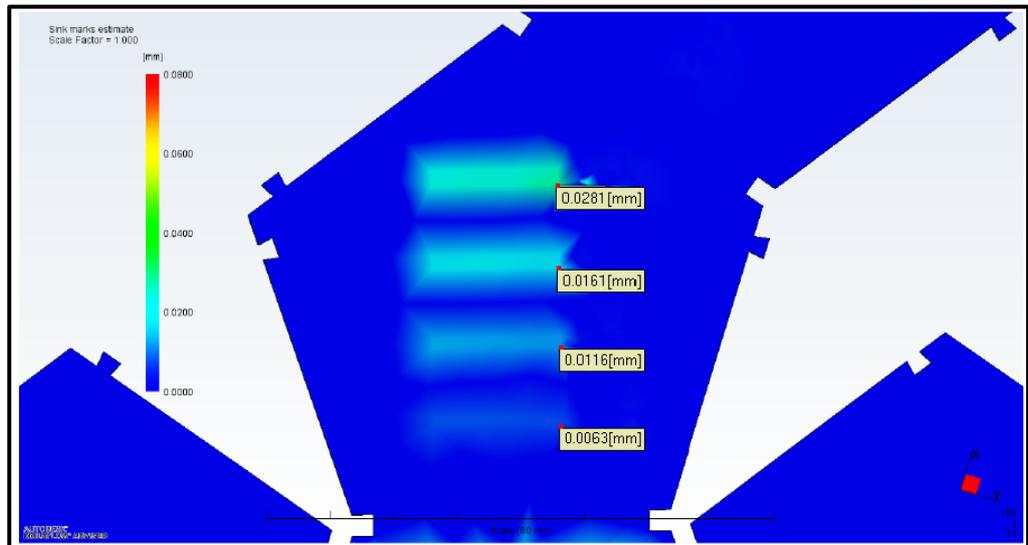
**Figura 3.11 Rechupe en la cara posterior del modelo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

La cara donde se ilustran el diseño de protuberancias presentó un rechupe significativo en una de las protuberancias mal diseñadas, donde el espesor es tan elevado que se presentaron las marcas de hundimiento con una profundidad de 0.069 mm. Otra región donde se puede apreciar una zona de rechupe considerable es en la cara de diseño de esquinas donde el rechupe tuvo una profundidad de 0.025 mm.

Finalmente, la figura 3.12 muestra el efecto del espesor de las protuberancias sobre una de las caras del modelo y la profundidad del rechupe en cada una de las protuberancias. Como se puede apreciar en la figura 3.12 entre mayor es el espesor, mayor es el rechupe en la cara contraria.

La protuberancia con 125% del espesor nominal del modelo tuvo una profundidad de hundimiento de 0.0281 mm, la protuberancia con 100% del espesor de la cara tuvo una profundidad de hundimiento de 0.0161 mm, la protuberancia con 75% del espesor de la cara tuvo una profundidad de hundimiento de 0.0116 mm y finalmente la protuberancia con 50% del espesor de la cara tuvo una profundidad de hundimiento de 0.0063 mm.



**Figura 3.12 Profundidad del rechupe en según espesor de protuberancia**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

Los resultados demuestran que el espesor de la protuberancia debe estar entre el 50% y el 75% del espesor nominal de la pared sobre la cual se levanta para que la marca de hundimiento no tenga una profundidad apreciable por el usuario. Los espesores de las protuberancias superiores al 75% del espesor sobre el cual se levantan, tendrán un efecto significativo con respecto a la profundidad de las marcas de hundimiento como se aprecia en los refuerzos con 100% y 125% del espesor de la cara.

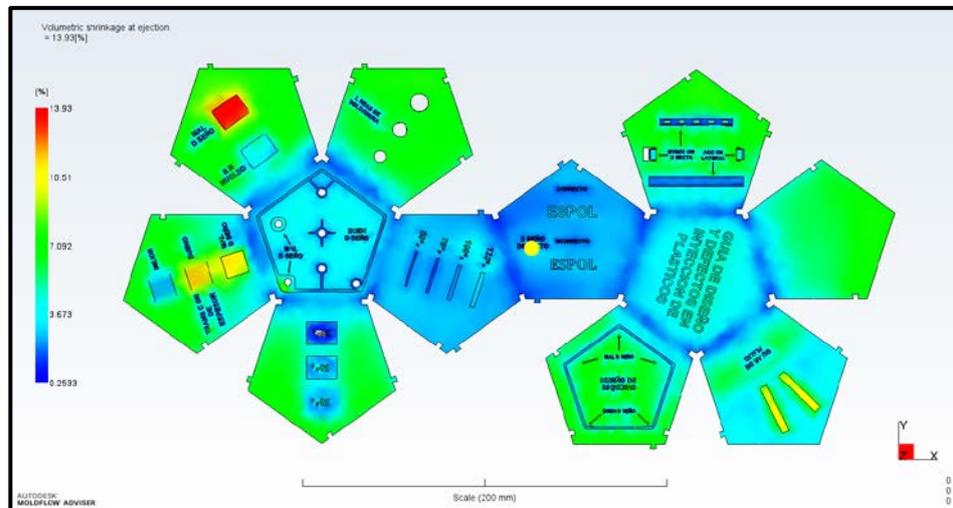
### 3.2.9 Contracción volumétrica en la eyección

El resultado de la contracción volumétrica en la eyección muestra la contracción volumétrica para cada área expresada como porcentaje del volumen del modelo original.

La contracción volumétrica en la eyección es el decremento en el volumen desde el final de la etapa de enfriamiento hasta que la pieza alcanza la temperatura ambiente de referencia (25° C).

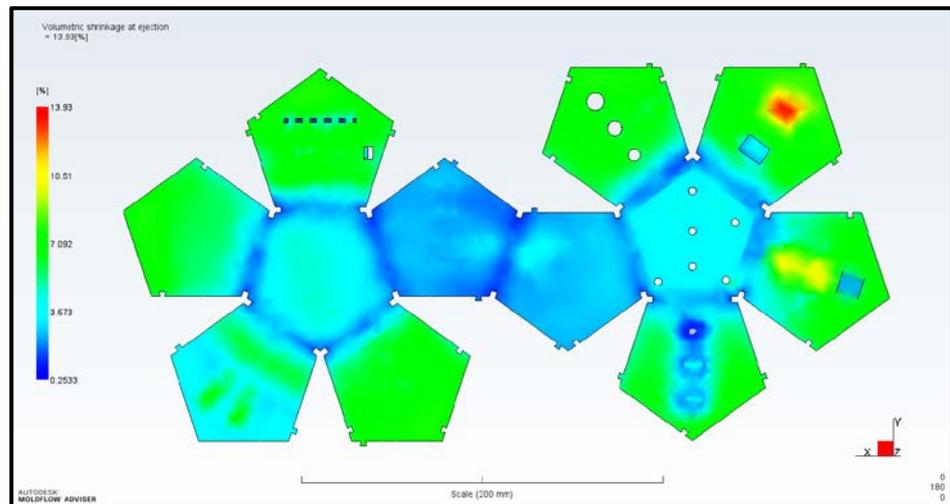
Este resultado puede ser utilizado para detectar marcas de hundimiento en el modelo. Altos valores de contracción pueden indicar marcas de

hundimiento dentro de la pieza. Las figuras 3.13 y 3.14 muestran el porcentaje de contracción volumétrica en la cara frontal y posterior del modelo, respectivamente.



**Figura 3.13** Contracción volumétrica del modelo, vista frontal

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

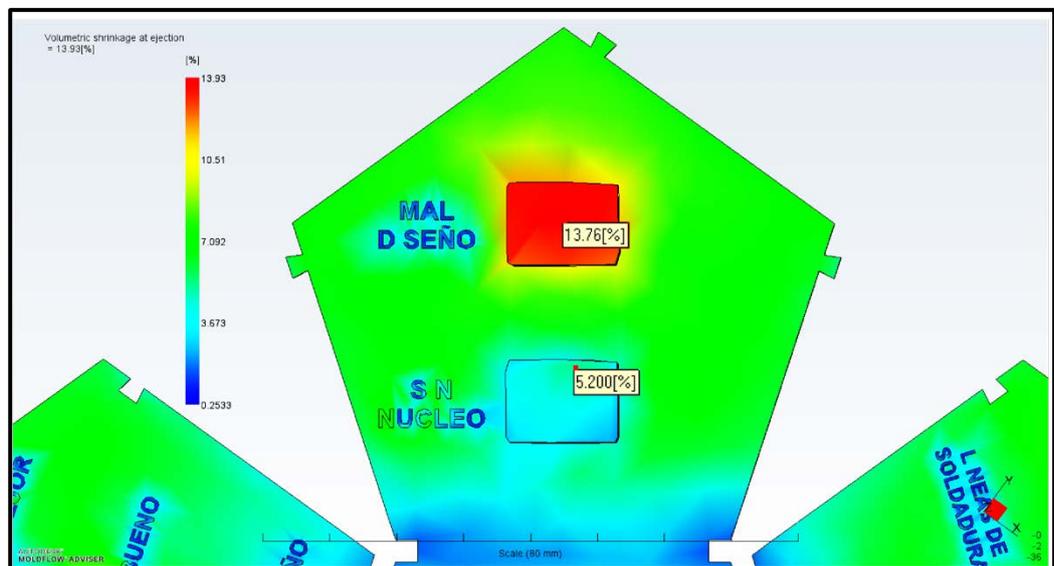


**Figura 3.14** Contracción volumétrica del modelo, vista frontal

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

La cara que ilustra la mejora en el diseño de secciones de mayor espesor en una pieza se muestra en la figura 3.15. Como se puede apreciar, existen dos cubos de similares dimensiones sobre la cara. La mejora en el diseño

del cubo de la parte inferior consiste en remover el núcleo de la sección, lo que deja al cubo sin material en su interior lo que previene una elevada contracción volumétrica como ocurre en el cubo de la parte superior.



**Figura 3.15 Efecto de remoción del núcleo en sección gruesa en la contracción volumétrica**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

La mejora en el diseño se basa en que al tener el cubo menos material en su interior, el tiempo de enfriamiento de la sección será menor por lo que el material no tendrá una contracción significativa. Por el contrario, el cubo sólido seguirá con fundido a alta temperatura en su interior luego de la etapa de llenado por lo que le tomará más tiempo llegar a la temperatura ambiente.

Este mayor tiempo de enfriamiento ocasionará una mayor contracción volumétrica produciendo marcas de hundimiento tanto como en la superficie del cubo como en la cara posterior sobre la que se levanta.

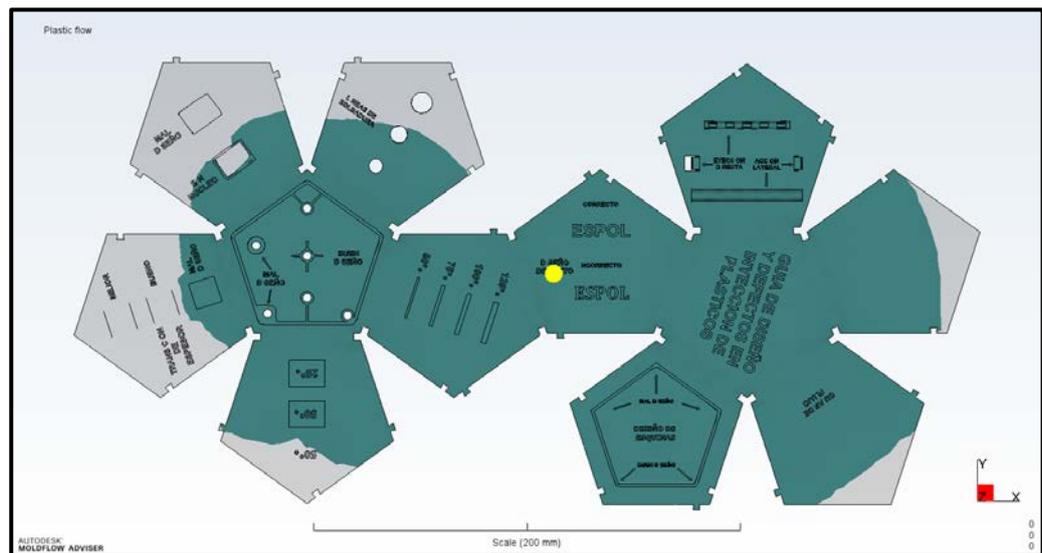
El máximo porcentaje de contracción volumétrica en el cubo sin núcleo es de 5.20%, mientras que el máximo porcentaje de contracción volumétrica en el cubo sólido llega al 13.76%. Esto ratifica la mejora en el diseño al remover el material al interior del cubo.

Un resultado similar se produce en la cara donde se ilustran las transiciones de espesor como se observa en la figura 3.13. La transición sin núcleo representa el mejor diseño para evitar posibles rechupes y contracción volumétrica.

### 3.2.10 Guías de flujo

Las guías de flujo por lo general protuberancias que se extienden desde la entrada a la cavidad del molde hacia las áreas difíciles de llenar. Estos cambios en el espesor de la pared son generalmente incorporados en las áreas no visibles o menos visibles de la pieza.

La figura 3.16 muestra el patrón de flujo en el modelo sin la inclusión de las guías de flujo en una de las caras del modelo.

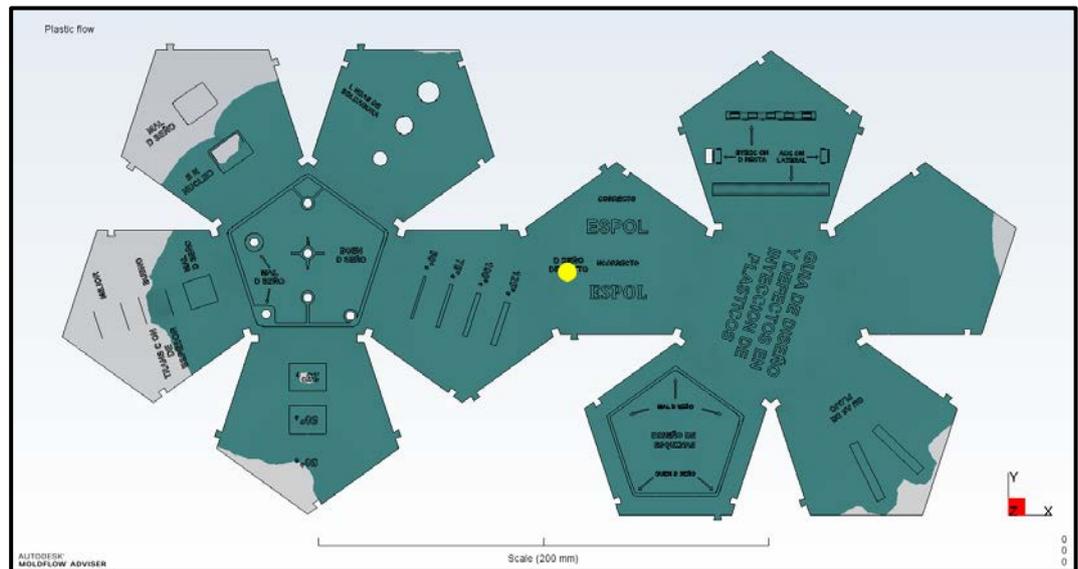


**Figura 3.16 Patrón de flujo sin guías de flujo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

Esta cara tiene una reducción de espesor que va desde los 2 mm hasta un espesor de 1.4 mm. Como se puede observar, el flujo tiene un patrón radial mientras llena esta cara.

Por lo contrario, la figura 3.17 ilustra el cambio en el patrón del flujo con la inclusión de las guías. Las guías de flujo atraen material hacia ellas y por esta razón el patrón de flujo tiende a fluir en la dirección de las guías lo que conlleva que el material pueda llegar más rápido a la esquina superior de la cara para conseguir un llenado más uniforme.



**Figura 3.17 Patrón de flujo con guías de flujo**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

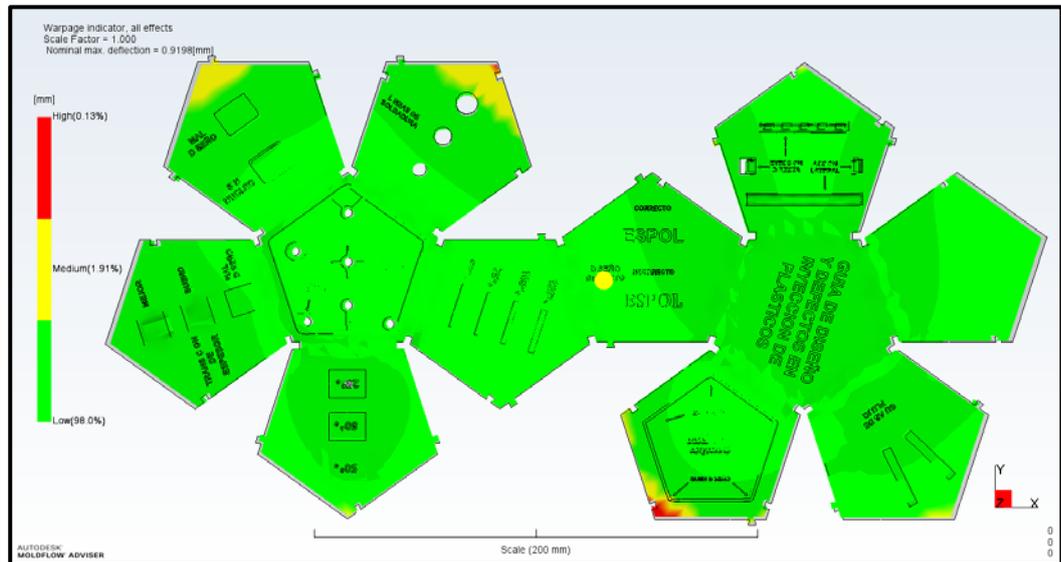
### 3.2.11 Pandeo total

El indicador de pandeo resalta aquellas áreas de la pieza donde las deflexiones que salen del plano se aproximen o excedan el valor nominal máximo de deflexión.

La figura 3.18 muestra el pandeo total que ocurre en el modelo. Esta deformación es el resultado de la contracción diferencial provocada por el diferencial de enfriamiento que ocurre en el modelo debido al patrón de flujo no uniforme.

Este tipo de defectos se corrigen mejorando el patrón de flujo en la pieza para alcanzar un patrón de llenado más uniforme. Debido a la complejidad

de la pieza y que el punto de inyección es el idóneo para un llenado más uniforme, se debería agregar un canal de enfriamiento en el molde para mejorar el enfriamiento en estas secciones del modelo y evitar así este defecto.



**Figura 3.18 Pandeo en el modelo debido a enfriamiento diferencial**

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

### 3.3 Comparación de resultados

En esta sección se realizará la comparación de los resultados teóricos contra los resultados obtenidos a través de la simulación. Los parámetros por comparar serán la caída de presión, la contracción volumétrica y la fuerza de cierre al final de la etapa de llenado.

La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos a través de la simulación utilizando el software Autodesk Moldflow Adviser, resultados que serán posteriormente comparados con los cálculos obtenidos en el capítulo anterior.

**Tabla 3.1 Resultados de la simulación**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
Tiempo de llenado (s)	1.89
Presión de inyección (MPa)	33.83
Área proyectada (cm <sup>2</sup> )	533.51
Fuerza de cierre (tonne)	109.1
Peso total al finalizar la etapa de llenado (g)	86.9
Peso final de la pieza (g)	93.77
Volumen inyectado (cm <sup>3</sup> )	109.56

Fuente: Autodesk Moldflow Adviser

Estos resultados son acordes a la capacidad de procesamiento de la máquina inyectora Lien Yu del laboratorio de procesamiento de plásticos de ESPOL, y cuyas especificaciones generales se muestran en el Apéndice B de este documento.

La tabla 3.2 muestra la comparación entre los resultados obtenidos analíticamente en el capítulo anterior y los resultados obtenidos mediante la simulación a través de software. Adicional a esto se presenta el porcentaje de error obtenido a través de ambos resultados.

**Tabla 3.2 Comparación de resultados teóricos vs Simulación**

<b>Parámetro</b>	<b>Teórico</b>	<b>Simulación</b>	<b>Error (%)</b>
Caída de presión (MPa)	36.4	33.83	7.06
Fuerza de cierre (tonne)	197.8	109.1	44.84
Contracción volumétrica (%)	12.6	13.93	10.55

Fuente: Elaboración propia

La simulación de la caída de presión tuvo resultados similares a la caída de presión obtenida a través de los cálculos presentados en el capítulo anterior. Sin embargo, los cálculos presentados en el capítulo 2 son el resultado de un análisis bidimensional del modelo, es decir, que no considera ningún tipo de protuberancia incluida en el modelo o transición de espesor entre las bisagras y las caras de este.

Esta consideración tiene como consecuencia que el resultado teórico sea ligeramente mayor que la simulación debido a que las transiciones de espesor reducen considerablemente la presencia de concentradores de esfuerzo y la caída de presión en cada cambio de espesor entre caras y bisagras.

La fuerza de cierre durante la etapa de empaquetamiento si tuvo una diferencia considerable entre la simulación y el resultado teórico. Esta gran diferencia radica en que para obtener la fuerza de cierre se asume que la presión está ejercida sobre toda el área de la cavidad. Esta asunción es conservadora y predice fuerzas de cierre más elevadas.

A diferencia del resultado teórico, la simulación modela la solidificación del fundido a través de la cavidad y la caída resultante en la presión del fundido. Por esta razón, la simulación predice una fuerza de cierre de 109.1 tonnes en la etapa de empaquetamiento, mientras que el resultado teórico fue de 197.8 tonnes.

Finalmente, la contracción volumétrica presenta un error del 10.6% entre los resultados teóricos y de la simulación. Esto se debe a que el cálculo de la contracción volumétrica considera la caída de presión del modelo. Esta caída de presión contiene un error discutido anteriormente, por lo que la contracción volumétrica incluirá este error en su cálculo.

Por otra parte, el cálculo de la contracción volumétrica no considera la geometría del modelo sino las propiedades físicas del material (PP) y las

condiciones de operación para determinar la contracción del material por lo que las secciones con mayor contracción volumétrica no serán incluidas en el resultado teórico, a diferencia de la simulación donde se considerará la geometría de modelo, las condiciones de operación y las propiedades físicas del material, por lo que la contracción volumétrica máxima será mayor que el resultado teórico.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se diseñó una pieza que contiene los principales defectos obtenidos en el proceso de moldeo por inyección de plásticos además de consideraciones de diseño para evitar estos defectos.
- La pieza cumple con las especificaciones del equipo inyector con respecto a dimensiones y peso de la pieza.
- Durante el diseño de la pieza se realizaron simulaciones computarizadas para validar la obtención de los defectos esperados en cada cara de la pieza.
- Mediante la simulación, se demostró la utilidad de la inclusión de las guías de flujo en un modelo para promover el flujo del fundido en dirección de estas.
- Mediante la simulación, se demostró que el espesor máximo que debe tener cualquier tipo de protuberancia en una pieza para evitar marcas de hundimiento debe ser de entre el 40% y 60% del espesor sobre el cual se levanta.
- A través de la simulación, se demostró la reducción en la contracción volumétrica en secciones gruesas extrayendo la parte interna de estas.
- Se obtuvo la caída de presión en la pieza a través de la simulación, obteniéndose un error del 7.06 % en comparación al resultado analítico.

- Se obtuvo la contracción volumétrica en la pieza a través de la simulación, obteniéndose un error del 10.55% en comparación con el resultado analítico.
- Se obtuvo la fuerza de cierre en la etapa de empaquetamiento en la pieza a través de la simulación, obteniéndose un error del 44.84% en comparación con el resultado analítico debido a principalmente a la consideración conservadora de los cálculos analíticos.
- Se construyó un prototipo de la pieza a través de impresión 3D.

## **4.2 Recomendaciones**

- Al momento de diseñar la pieza se debe tener en consideración la capacidad de inyección de la máquina para determinar las dimensiones finales de la pieza.
- Es recomendable realizar una simulación con las condiciones de trabajo reales de la máquina inyectora para poder obtener una mejor visualización del resultado final de la pieza y realizar posibles modificaciones.
- Se recomienda construir un molde con un punto de inyección único para reducir los costos de construcción del molde y complejidad en el diseño del sistema de inyección.
- Distribuir la pieza entre los principales diseñadores y constructores de piezas plásticas del país para mejorar la calidad de las piezas obtenidas por el proceso de inyección para potenciar las exportaciones de este tipo de productos hacia el extranjero.

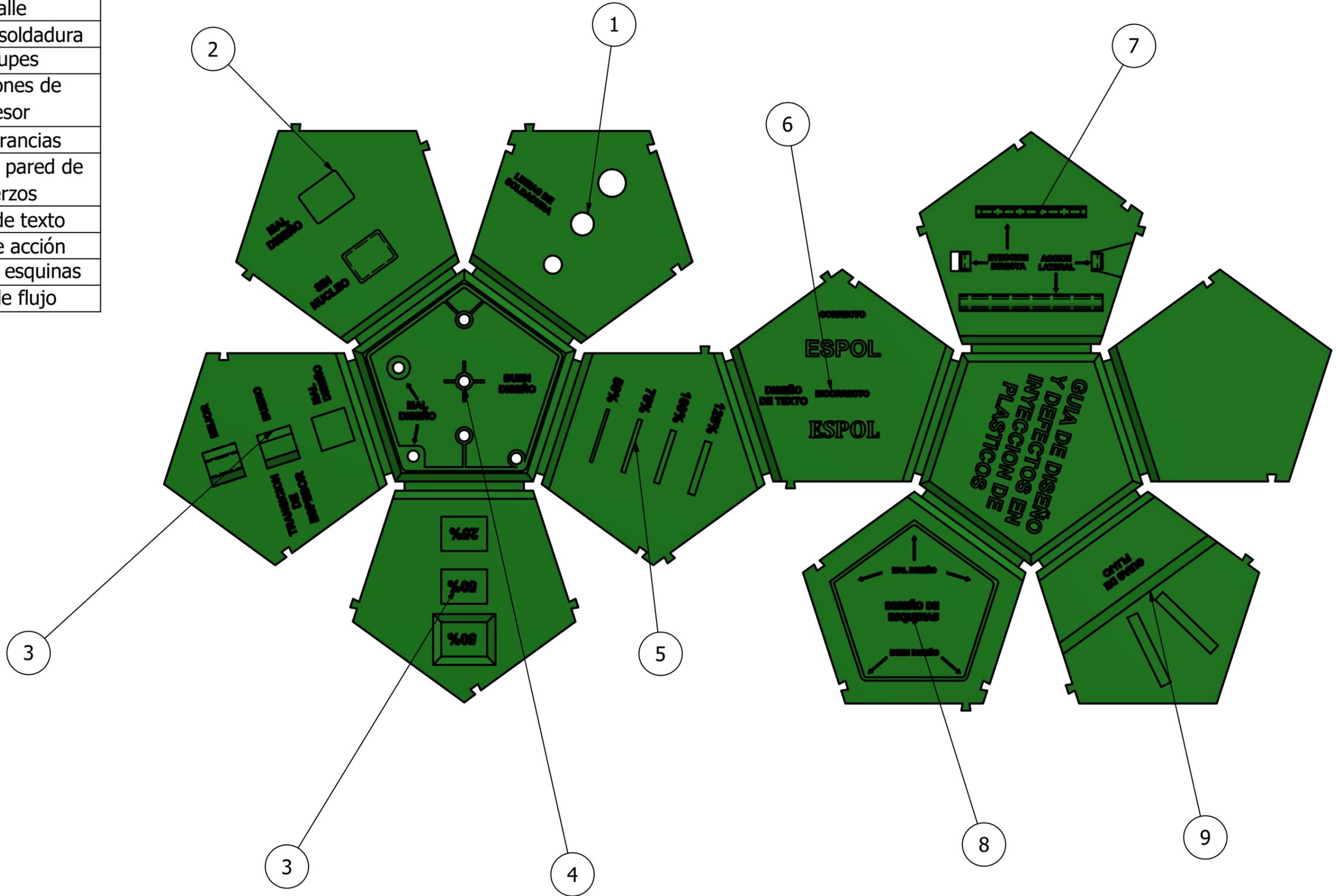
# BIBLIOGRAFÍA

- Braskem. (2009). Obtenido de <http://www.nutecamerica.com/contenido/hoja-tecnica/PPCOPOCP141.pdf>
- Deng, Y., Lam, C., Tor, S., & Britton, G. (2002). A CAD-CAE Integrated Injection Molding Design System. *Engineering with Computers*, 80-92.
- Greenpeace. (2018). Obtenido de <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Parar-la-contaminacion/Plasticos/Datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. McGraw-Hill.
- Kazmar, D. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Massachusetts: Hanser.
- Malloy, R. (2010). *Plastic Part Design for Injection Moulding*. Londonderry: Hanser.
- Mathivanan, D., Nouby, M., & Vidhya, R. (2010). Minimization of sink mark defects in injection molding process - Taguchi approach. *International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2*, 13-22.
- Ministerio de Industrias y Productividad. (Mayo de 2015). <http://www.industrias.gob.ec/>. Obtenido de [http://servicios.industrias.gob.ec/siipro/downloads/temporales/21\\_1\\_Industria%20de%20transformacion%20de%20plasticos%20en%20Ecuador.compressed.pdf](http://servicios.industrias.gob.ec/siipro/downloads/temporales/21_1_Industria%20de%20transformacion%20de%20plasticos%20en%20Ecuador.compressed.pdf)
- Proto Labs. (2017). *Sugerencias de diseño para varios procesos*. Obtenido de <https://www.protolabs.es/recursos/sugerencias-de-diseno/>
- *Revista Líderes*. (12 de Julio de 2015). Obtenido de <http://www.revistalideres.ec/lideres/industria-plastico-contraccion-produccion.html>
- Stratasync. (2015). Obtenido de [https://www.stratasyncdirect.com/-/media/files/direct/design-guidelines/injection\\_molding\\_design\\_guidelines\\_2017.pdf](https://www.stratasyncdirect.com/-/media/files/direct/design-guidelines/injection_molding_design_guidelines_2017.pdf)

# APÉNDICES

**APÉNDICE A**  
**Planos Esquemáticos**

ESPECIFICACIONES	
Cara	Detalle
1	Líneas de soldadura
2	Rechupes
3	Transiciones de espesor
4	Protuberancias
5	Espesor de pared de refuerzos
6	Diseño de texto
7	Levas de acción
8	Diseño de esquinas
9	Guías de flujo



Designed by Peralta	Checked by	Approved by	Date	Date Febrero 2018
ESPOL			PLANO GENERAL	
			Edition	Sheet 1/ 2



## **APÉNDICE B**

### **Especificaciones de la Máquina de Inyección Lien Yu**

# Información básica de la inyectora:

## Especificaciones generales

Información básica de la máquina de moldeo por inyección

Especificaciones generales para D075 – D205

	MODEL	UNITS	D.75		
INJECTION	Screw Diameter	mm	28	32	36
	Screw L/D Ratio	L/D	22.8	20	17.8
	Swept Volume	cc	98	128	162
	Max Shot Weight (P.S)	g	88	115	146
		oz	3.1	4.0	5.1
	Max Injection Pressure	bar	2321	1777	1404
	Max Injection Rate	g/sec	49	65	82
Screw Stroke	mm	160			
LOCKING	Max Locking Force	tonne	75		
	Max Opening Stroke	mm	270		
	Min Mould Height	mm	100		
	Max Mould Height	mm	360		
	Max Daylight	mm	630		
	Space Between Tie bars	mm	320 x 320		
	Diameter of tie bars	mm	55		
	Max Ejector foward Force	tonne	2.74		
	Max Ejector Stroke	mm	80		
	GENERAL	Pump Drive Motor	kw (HP)	7.5 (10)	
Hydraulic Pressure		bar	140		
Heating Capacity		kw	4.0		
Number of Heating Zones		qty	3+N		
Oil Filling		liter	220		
Machine Dimensions (LXWXH)		m	3.8x1.05x1.5		
Machine Weight dry		kgs	3500		

Fuente: Lien Yu Machinery, 2010

**APÉNDICE C**  
**Prototipo Final**

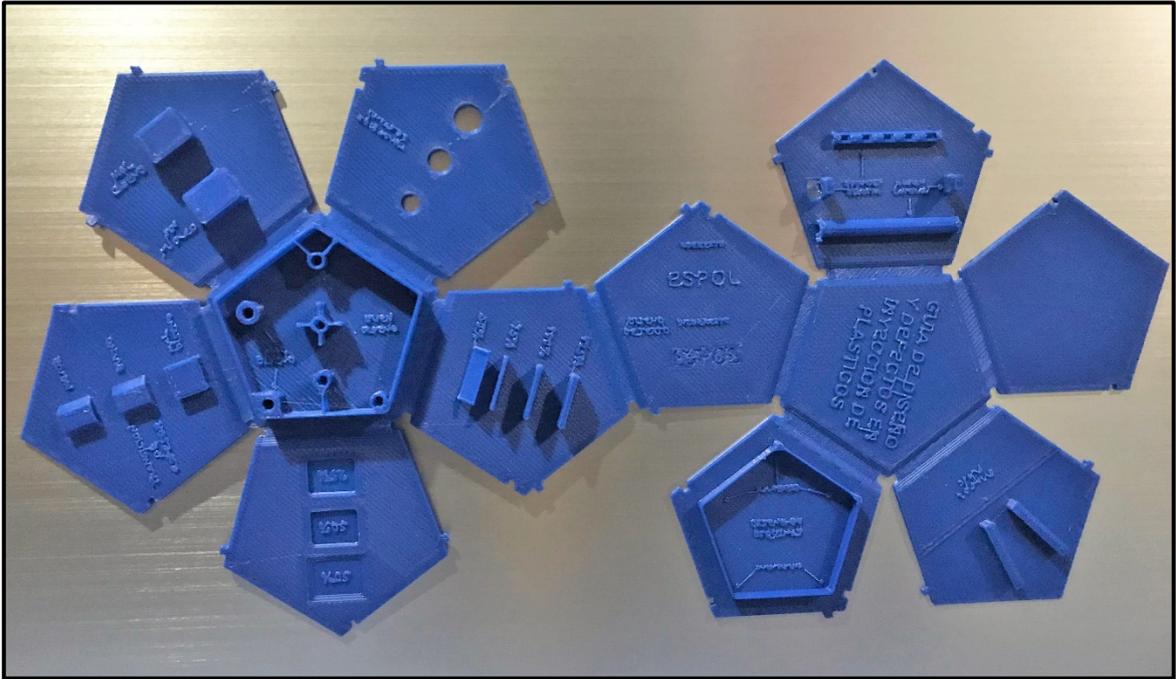


Imagen 1. Prototipo impreso a través de impresión 3D.

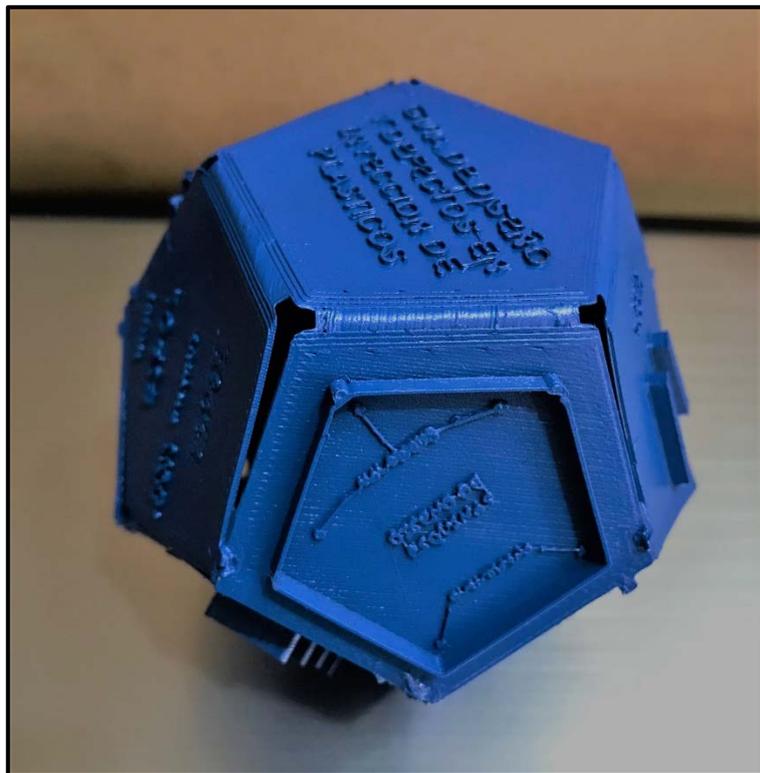


Imagen 2. Prototipo armado.