



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA RELACION GEOMETRÍA-RIGIDEZ EN PIEZAS DE
MATERIAL PLASTICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

RAMÓN FLORES GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÁLVARO AYALA RUIZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F. 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A mi madre:

Que me brindó todo su entusiasmo, valentía, fuerza, alegría, visión y el amor más grande que puede dar un ser humano, sin escatimar esfuerzo alguno, ya que la ilusión de su vida fue convertirme en persona de provecho.

A mi padre:

Que es el apoyo y ende más importante en mi vida y que ha sacrificado parte de la suya, para formarme y educarme. Que con nada en el mundo voy a terminar de pagarle y agradecerle los sacrificios que hizo por mí, sin embargo, le puedo decir que hemos logrado uno de nuestros objetivos.

A mis hermanos Marco y Miky:

Por ocupar gran parte de mi corazón y pensamiento, por ser mis compañeros y amigos que han luchado a mi lado día a día, incluso para superar las peores situaciones.

Al Dr. Álvaro Ayala:

Que como parte fundamental para el desarrollo de este trabajo, me brindó su conocimiento y confianza.

Al Ing. Miguel A. Cruz:

Por compartir parte de su conocimiento para el desarrollo de este trabajo.

A mí Karína:

Porque eres de esa clase de personas que todo lo comprenden y dan lo mejor de sí mismos sin esperar nada a cambio...porque sabes escuchar y brindar ayuda cuando es necesario...por que sabes que te amo.

A mis verdaderos amigos:

Víctor, Cristian Macías, Eder, Leonardo (Parejota), Gerardo, Sam, Elisa, Félix, Arturo, Hicra, Sofía, Jorge Romero y Aídee, que más que amigos, nos convertimos en una familia a lo largo de estos años, compartiendo conocimiento y brindándome su apoyo, incluso cuando creía que no lo necesitaba.

ÍNDICE

Página

Introducción.....1

Capítulo 1

Máquinas, plásticos y moldes de inyección

1.1. Introducción.....3

1.2. Máquinas de inyección.....3

 1.2.1. Unidad de inyección y unidad de cierre.....4

 1.2.2. Clasificación de máquinas de inyección de plásticos.....4

1.3. Ciclo de moldeo.....6

1.4. Definición de las variables del proceso de inyección.....8

 1.4.1. Presión.....8

 1.4.2. Temperatura.....8

 1.4.3. Velocidad.....9

 1.4.4. Tiempo.....9

1.5. Materiales plásticos.....9

 1.5.1. Acetato de celulosa.....10

 1.5.2. Policarbonato.....10

 1.5.3. Cloruro de Polivinilo (PVC-rígido).....10

1.5.4. Cloruro de Polivinilo (PVC posclorado).....	10
1.5.5. Poliamida.....	11
1.5.6. Poliuretano.....	11
1.5.7. Polietileno de baja presión.....	11
1.5.8. Polietileno de alta presión.....	11
1.5.9. Polipropileno.....	12
1.5.10. Polibutileno Teraptalato.....	12
1.6. Moldes de inyección.....	12
1.6.1. Elementos del molde.....	13
1.6.1.1. Mazarota, vela o colada	13
1.6.1.2. Venas de distribución.....	14
1.6.1.3. Punto de inyección.....	14
1.6.2. Clasificación de moldes de inyección.....	16
1.6.2.1. Tipo de colada.....	16
1.6.2.2. Tipo de número de cavidades.....	16
1.6.2.3. Tipo de canales de enfriamiento.....	17
1.6.2.4. Tipo numero de placas.....	17
1.6.2.5. Tipo de desmoldeo.....	18

Capítulo 2

Problemas de inyección y refuerzos para piezas de plástico

2.1. Introducción.....	19
2.2. Descripción, causa y posible solución de problemas de inyección.....	19
2.2.1. Marcas de humdimiento.....	19
2.2.2. Huecos.....	20
2.2.3. Encogimiento.....	20
2.2.4. Rechupes.....	20
2.2.5. Ráfagas.....	21
2.2.6. Las líneas de soldadura.....	21
2.2.7. Efecto de surco de disco.....	22
2.2.8. Piezas incompletas.....	22
2.2.9. Rebabas.....	22
2.2.10. Marcas de expulsión visibles.....	23
2.2.11. Dificultad de extracción de la pieza.....	23
2.2.12. Líneas de flujo.....	24
2.2.13. Formación de burbujas.....	24
2.2.14. Alabeo, pandeo, torcido.....	24
2.3. Influencia de la presión, temperatura y tiempo.....	25
2.4. Refuerzos para piezas de material plástico.....	29

2.4.1. Costillas.....	29
2.4.1.1. Recomendaciones de diseño para costillas.....	29
2.4.1.2. Unión de costillas y perfil de pared.....	31
2.4.2. Costillas en forma circular y cartabones	32
2.4.2.1. Recomendaciones de diseño para costillas en forma circular y cartabones.....	33
2.4.2.2. Recomendaciones de fabricantes de tornillos.....	36

Capítulo 3

Desarrollo del trabajo

3.1. Introducción.....	39
3.2. Validación del software.....	39
3.3. Desarrollo del modelo.....	40
3.3.1. Configuraciones.....	41
3.3.2. Identificador de perfiles (código).....	42
3.3.3. Material.....	43
3.3.4. Análisis.....	43
3.3.5. Análisis de momento de inercia en perfiles de trabajo.....	44
3.4. Resultados de desplazamiento.....	47
3.5. Análisis de resultados de desplazamiento.....	49
3.5.1. Análisis de resultados de Elemento Finito.....	49

3.6. Análisis de inyección.....	50
3.7. Resultados de inyección.....	51
3.7.1. Presión de inyección.....	51
3.7.2. Tiempo de inyección.....	54
3.7.3. Tiempo total del ciclo.....	55
3.7.4. Moldeabilidad.....	57
3.8. Análisis de resultados de inyección.....	57

Capítulo 4

Caso de estudio

4.1. Introducción.....	60
4.2. Consideraciones fundamentales.....	61
4.3. Metodología.....	61
4.4. Análisis de simulación.....	63
4.5. Resultados de simulación.....	68
4.6. Análisis de resultados.....	70
4.6.1. Análisis de resultados de desplazamientos.....	70
4.6.2. Análisis de resultados de esfuerzos.....	70

Conclusiones.....73

Glosario.....76

Bibliografía.....85

INTRODUCCIÓN

En el diseño de piezas de material plástico se busca la integridad estructural sin crear paredes de gran espesor, para lograr lo anterior es necesario aumentar la rigidez de la pieza o el valor del momento de inercia. Esto es especialmente verdad en piezas sujetas a cargas por flexión. Los elementos usados como refuerzos para esto, son las costillas. Existen otros métodos aceptables para el mejoramiento de propiedades en secciones de plástico, como las costillas en forma circular, que además sirven como alojamiento y sujeción para elementos de fijación [1] y que se utilizan en conjunto con las costillas cuando se esperan fuerzas laterales, así mismo, existe la opción de los cartabones.

Aunque el uso de costillas da a los diseñadores una gran oportunidad de obtener una eficiente respuesta estructural en piezas de plástico, el uso de refuerzos de costillas puede resultar en problemas de apariencia y alabeo en la pieza, durante el proceso de inyección. En dichos problemas de inyección, interviene el mal uso de las siguientes variables: presión, temperatura, tiempo y velocidad de inyección. El conocimiento del diseño de refuerzos para piezas de plástico es limitado, debido a que existen dudas de cómo usarlos, además de que los manuales desarrollados, se basan en la experiencia de los diseñadores. Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es validar la rigidez que brindan los refuerzos de costillas en piezas de material plástico, analizadas con respecto a su geometría.

El resultado obtenido en el presente trabajo proporciona información para el diseño de costillas, como refuerzos en piezas de plástico que le ayudará a los diseñadores, durante el proceso de diseño de la pieza, encontrar el óptimo desempeño en geometría-rigidez.

Para lograr el objetivo, el trabajo se desarrolló de la siguiente manera; en el capítulo 1 se presenta los antecedentes referentes al procesamiento y tipos de plásticos más utilizados en la industria, así como, generalidades de moldes de inyección; en el capítulo dos, se presentan los problemas que ocurren durante el proceso de inyección, sus posibles causas y soluciones, considerando algunos factores como: el molde, la máquina de inyección y variables de proceso (presión, temperatura tiempo y velocidades), así como la propuesta de refuerzos en piezas de plástico (costillas, costillas en forma circular y cartabones), como un medio eficaz para el aumento de rigidez; en el capítulo tres, se describe la metodología y análisis del trabajo, para validar la rigidez en piezas de material plástico (mostrando las consideraciones, análisis, parámetros y resultados pertinentes) con la

implantación de costillas como refuerzos, en conjunto, con la evaluación de moldeabilidad de las piezas en estudio; finalmente, en el capítulo 4, se presenta un caso de estudio, con la propuesta de una geometría de costillas para mejorar la rigidez en un pedal de acelerador de auto, a partir de un análisis de elemento finito (FEM) en UG NX-5, finalmente se presentan las conclusiones.

CAPÍTULO 1

MÁQUINAS, PLÁSTICOS Y MOLDES DE INYECCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán los antecedentes y aspectos teóricos de la importancia tecnológica y comercial del procesamiento del plástico, aprovechando una lista atractiva de propiedades para diversas aplicaciones en ingeniería, con el fin de establecer el contexto general del proceso de inyección de plástico que comprende la inyección por moldeo, como un proceso de fabricación rápido y económico de artículos útiles y con formas geométricas complejas, además de la correcta selección de cada una de las herramientas para maximizar la rentabilidad de los recursos. Para mejorar la productividad y calidad de las piezas de plástico fabricadas por inyección, se deben considerar los siguientes puntos: el molde, el medio ambiente, la máquina de inyección y las variables de proceso: presión, tiempo, temperatura y velocidades.

Los plásticos de ingeniería se conocen desde mediados de siglo XIX. Las resinas termoplásticas han desplazado cada vez más a los metales, a pesar de tener propiedades no favorables como menor rigidez, resistencia a la tensión y baja dureza.

Para superar problemas estructurales que pueden surgir en piezas de plástico, se puede recurrir a refuerzos como costillas, costillas en forma circular (para alojamiento y/o sujeción de elementos de fijación) y cartabones, que son un medio eficaz para el aumento de rigidez, ya que en ocasiones, el aumento de espesor de las paredes de la pieza no es la solución, surgiendo algunos problemas en el ciclo de moldeo y ocasionando que la pieza no tenga los requerimientos necesarios.

1.2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN

Una máquina de inyección de plásticos es un conjunto de sistemas hidráulicos, mecánicos, eléctricos y neumáticos, acoplados con el fin de transformar un material plástico a una forma específica, solucionando gran cantidad de problemas en la industria e implementando gran variedad de procesos y materiales.

Una máquina de inyección consta del dispositivo dosificador, mecanismos de cierre e inyección, accionamiento, cuadro de mandos, el control y regulación de temperatura. El parámetro fundamental de una máquina de moldeo por inyección es el volumen máximo de la pieza. La presión específica de inyección depende del material y el grado de plastificación previa.

1.2.1. Unidad de inyección y unidad de cierre

Una máquina de inyección está compuesta básicamente de dos componentes que son la unidad de inyección y la unidad de cierre [3]:

Unidad de inyección: La tarea de la unidad de inyección consiste en introducir dentro de los canales de flujo del molde una cantidad de material predeterminada que corresponda al volumen de la cavidad del molde. Las principales funciones de la unidad de inyección son: La aportación del material, plastificación y accionamiento del émbolo inyector [2].

Unidad de cierre: La tarea de la unidad de cierre es abrir y cerrar el molde, manteniendo a éste, en una presión determinada bajo las operaciones de inyección y refrigeración [2]. Se cuenta con tres sistemas de unidad de cierre del molde para máquinas de inyección:

1. Hidráulicos de acción directa.
2. De palanca (Hidro y electromecánicos). Proporcionan un cierre perfecto del molde y el esfuerzo que se desarrolla en el eslabón motriz es mínimo.
3. Tornillo (electromecánicos).

1.2.2. Clasificación de máquinas de inyección de plásticos

En la fabricación de materias por el proceso de inyección de plásticos se dispone de una variedad de máquinas con características diferentes en el diseño, así como, en sus sistemas de accionamiento [3]. Para la clasificación de las máquinas de inyección de plásticos, podemos considerar la disposición de los ejes de separación del molde y del mecanismo de inyección, como a continuación se describen:

a) Horizontales: El material se inyecta perpendicularmente al plano del molde ó el flujo de inyección se desvía con un ángulo de 90° hacia la boquilla en dirección horizontal (Fig. 1.1.A y 1.1.B).

b) Verticales: Se inyectan perpendicular al plano de separación del molde, pero en posición vertical (Fig. 1.1.C).

c) Angulares: La inyección se hace en posición angular respecto a la unidad de cierre y el material puede ser penetrado en forma rectilínea en el plano de separación del molde (Fig. 1.1. D) [3].

d) Máquinas con configuraciones diferentes: Para este caso, existen las máquinas de inyección tipo revolver y rotatorias: sólo un mecanismo de plastificación e inyección abastece varios moldes dispuestos sobre una mesa o plato giratorio, permitiendo aumentar la producción.

También se puede considerar si la máquina de inyección es de émbolo o de husillo:

a) Máquinas de inyección de tipo husillo: Se utilizan cuando se requiere gran capacidad plastificadora, capaces de desplazarse axialmente y con elevada calidad de plastificación [2].

b) Máquinas de inyección de tipo émbolo: Se requieren para moldear artículos pequeños de materiales termoestables.

c) Máquinas de inyección de tipo émbolo-husillo: Permiten combinar la capacidad de plastificación elevada de las máquinas de husillo con la gran presión de inyección que desarrollan las de émbolo.

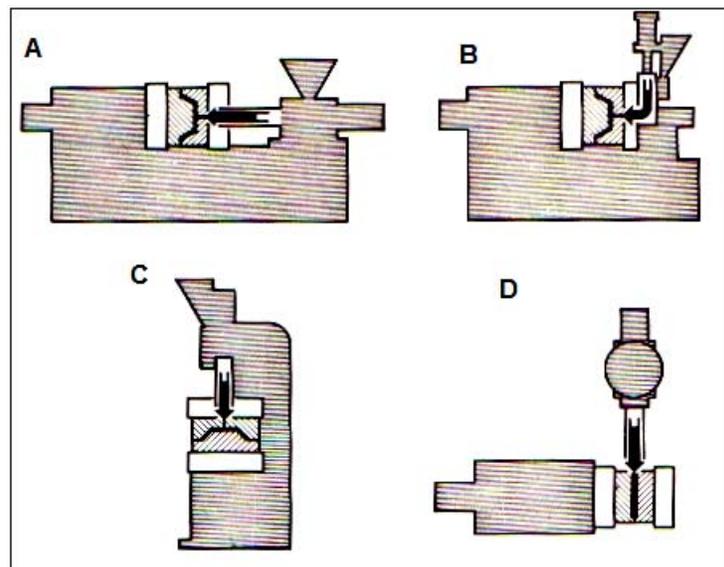


Figura 1.1. Disposición de dirección de máquinas de inyección [3]. (A) Trabajo horizontal. (B) Variante de A con cilindro de inyección vertical. (C) Trabajo vertical. (D) Unidad inyectora en posición angular respecto a la unidad de cierre.

1.3. CICLO DE MOLDEO

El moldeo por inyección consiste en inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica, para dar forma al producto. El ciclo de moldeo para producir piezas moldeadas por inyección es el siguiente (Fig. 1.2 y 1.3) [18]:

Etapa I: Esta etapa abarca el cierre del molde, la inyección del plástico y proceso de mantenimiento (segunda presión). El molde de inyección (1) se encuentra cerrado y vacío y la unidad de inyección llena de material fundido. La boquilla de inyección asignada con el número (2) se acopla al bebedero del molde y el material plastificado (a consecuencia de la rotación del husillo y la transmisión de calor de los calentadores (4) se inyecta en la cavidad por medio del husillo (3), que es accionado con un cilindro hidráulico (10). La etapa de retención, donde se aplica la presión de mantenimiento, mientras el material se enfría para evitar la contracción. Una vez que se inicia la solidificación, puede eliminarse la presión de mantenimiento.

Etapa II: En esta etapa se realiza el proceso de dosificación y refrigeración del material. La válvula cierra e inicia la rotación del husillo, que esta accionado por un motor (5) a través de un reductor (6). La presión se aplica a la boquilla cerrada y el husillo se mueve hacia atrás para acumular una nueva carga de material fundido. El proceso de refrigeración comienza desde el proceso de inyección, finalizando antes de la apertura del molde.

Etapa III: Apertura del molde y expulsión de la pieza: Al terminar el enfriamiento, el molde se abre por medio de un mecanismo (12) y se expulsa la pieza inyectada (13) [2]. El molde cierra y se inicia de nuevo el ciclo.

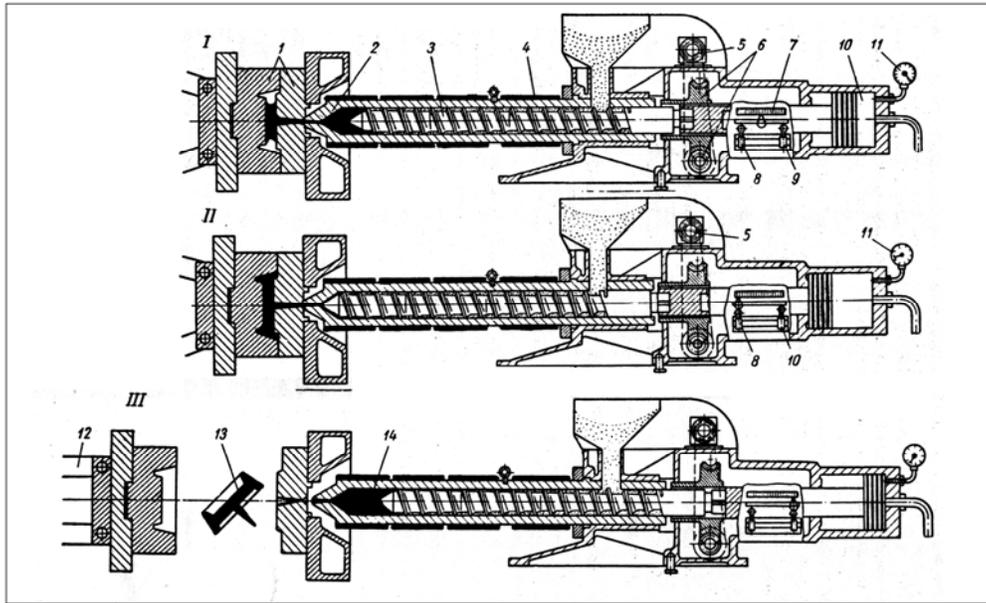


Figura 1.2. Proceso de inyección en una máquina de inyección con husillo. Inyección (I), dosificación y refrigeración del material (II) y apertura del molde y expulsión de la pieza (III).

En la figura 1.3 se muestra el ciclo de moldeo por inyección gráficamente, donde se describen el desarrollo del proceso como se explicó anteriormente, en función del tiempo:

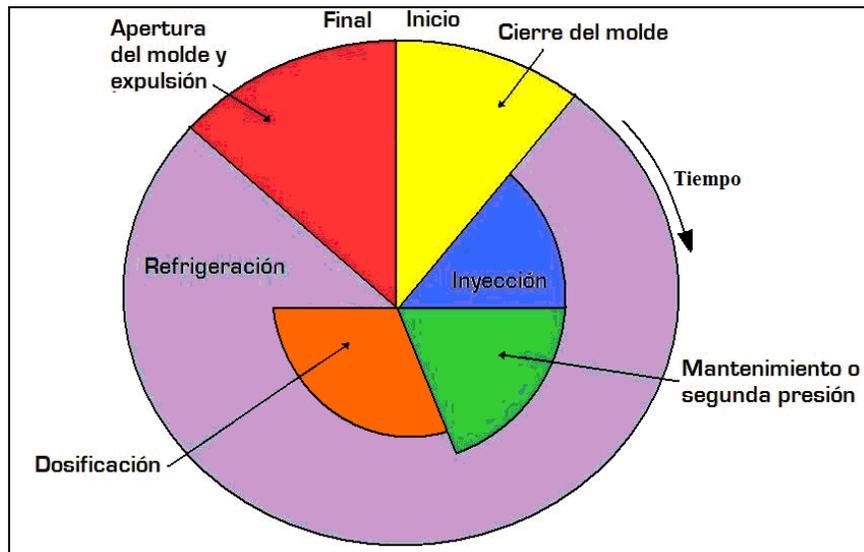


Figura 1.3. Ciclo de inyección [17].

1.4. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE INYECCIÓN

Las variables a controlar en el proceso de inyección dependen del material a trabajar, del diseño del molde y la pieza. Las variables a controlar son: temperaturas, velocidades, presiones y tiempos.

1.4.1. Presión

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

Segunda presión de inyección: También conocida como de mantenimiento, tiene como objeto mantener bajo presión el material fundido que se solidifica y se contrae en la cavidad del molde; completar el llenado y compensar la contracción, introduciendo un poco más de material fundido en el molde.

Contrapresión: Durante la plastificación, el material es llevado hacia delante cuando el husillo va girando hacia atrás, la contrapresión se aplica sobre el husillo que gira y tiene la función de impedir el retorno de éste, mejorando la acción de la mezcla del material. Esto ayuda a que se logre una buena homogenización del plástico.

Presión de expulsión: Una vez terminada la apertura del molde, la pieza se debe separar del molde, y esto se logra a través de un mecanismo de expulsión, que requiere de una presión de botado, activada durante toda la fase de expulsión.

1.4.2. Temperatura

Las temperaturas que se manejan durante el proceso de inyección son las siguientes: temperatura del cilindro de plastificación, temperatura de la boquilla y temperatura del molde.

La temperatura del cilindro de plastificación y de la boquilla, están dadas por el tipo de material con el que se va a trabajar, ajustándose de acuerdo a la temperatura de la masa fundida, la cual debe ser constante y uniforme. De igual manera la temperatura del molde esta determinada por el material plástico con el que se trabajará.

1.4.3. Velocidad

Velocidad de cierre de molde: Es la distancia que recorre el plato móvil hasta hacer contacto con el plato fijo del molde, en un tiempo determinado.

Velocidad de apertura de molde: Es la distancia que recorre el plato móvil del molde hasta separarse del plato fijo y dejar el espacio suficiente para la expulsión de las piezas en un tiempo determinado.

Velocidad de plastificación: La velocidad de plastificación se controla con las revoluciones por minuto del husillo o tornillo, al momento de la plastificación. La velocidad de inyección dependerá de los siguientes factores: la viscosidad del material, tamaño de los canales o venas de alimentación del material, temperatura de la masa fundida, temperatura del molde y las condiciones del molde.

Velocidad de expulsión: Es la distancia que recorren los expulsores en un tiempo determinado para expulsar la pieza moldeada [24].

1.4.4. Tiempo

Tiempo de inyección: Es el tiempo que se requiere para el llenado de las cavidades del molde.

Tiempo de postpresión: Es el tiempo en que permanece activa la segunda presión.

Tiempo de plastificación: Es el tiempo requerido para llevarse a cabo la fusión del material, hasta llevarlo a un estado líquido viscoso.

Tiempo de enfriamiento: Es el tiempo que se requiere para solidificar la pieza.

Tiempo de ciclo: Es el tiempo en el que se llevan a cabo las etapas del proceso de inyección [24]

1.5. MATERIALES PLÁSTICOS

Los plásticos tienen la característica que pueden deformarse hasta conseguir la forma deseada por medio de inyección y moldeo. Por el tipo de estructura interna se considera apropiado dividir los plásticos en las siguientes categorías: materiales termoplásticos, termofijos y elastómeros. A continuación se presenta un listado de algunos materiales plásticos, mencionando algunas propiedades, parámetros y formas de uso (es necesario tener presente la información de cada fabricante):

1.5.1. Acetato de celulosa (CA)

Este material puede ser incoloro, transparente y coloreado en todas las tonalidades, con un aspecto córneo. Algunas propiedades que presenta son: elevada tenacidad (apropiado para piezas con inserciones metálicas); buen brillo y atrae poco el polvo; la temperatura máxima sin presentar deterioros es de 60 a 85°C; es estable frente a las grasas y aceites; olor picante (acético) y a papel quemado; conductividad térmica (λ) de 0.22 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20°C de 1.3g/cm³; secado previo de 1.5 a 2 horas con una temperatura de 80°C y la contracción que experimenta es de 0.5 a 0.7%.

1.5.2. Policarbonato (PC)

Este material es transparente, incoloro a ligeramente amarillento. Presenta alta resistencia mecánica dentro de un amplio campo de temperaturas; buenas propiedades dieléctricas; alta estabilidad de dimensiones y al calor; no absorbe mucho el agua y soporta de 110 a 135°C (como temperatura máxima de trabajo); tiene una conductividad térmica (λ) de 0.17 kcal/mh°C; calor específico (c) de 0.28 kcal/kg°C; densidad (ρ) a 20°C de 1.2 g/cm³; se requiere de un tiempo de secado de 8 a 12 horas a 120-130°C y cuenta con una contracción de 0.4 a 0.8%.

1.5.3. Cloruro de Polivinilo (PVC rígido)

Se presenta en polvo fino o gránulo, con colores desde transparentes claros, hasta opacos. Sus propiedades generales son: buena resistencia mecánica, dureza y tenacidad; resistente a la corrosión; buenas propiedades dieléctricas y difícilmente combustible; la temperatura de uso permanente no perjudicial es de 60 a 70°C; olor ácido clorhídrico (irritante); conductividad térmica (λ) de 0.14 kcal/mh°C; calor específico (c) de 0.23 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20°C 1.4 g/cm³ y presenta una contracción de 0.4 a 0.5%.

1.5.4. Cloruro de Polivinilo (PVC posclorado)

Se presenta en forma de gránulo y en preparaciones especiales en forma de polvo con diversos tonos opacos. En cuanto a sus propiedades generales presenta, buena estabilidad térmica, incluso hasta 105°C; buena resistencia, dureza y tenacidad; resistente a la corrosión; buenas propiedades dieléctricas y se puede considerar una temperatura de uso permanente de 80 a 90°C. Factor de contracción 0.5 a 0.6 %.

1.5.5. Poliamida (PA)

Masas granuladas en colores naturales (blanco amarillento) opacas y coloreadas. En cuanto a sus propiedades generales presenta: un elevado alargamiento y tenacidad; resistencia al desgaste; buena estabilidad térmica; alta capacidad de absorción de agua; buena capacidad de vaporización y se torna quebradizo al secarse; la temperatura de uso permanente sin prejuicios esta entre 90 y 110°C; conductividad térmica (λ) de 0.22 kcal/mh°C; calor específico (c) 0.4 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20°C 113 g/cm³; cuenta con un factor de contracción de 1 a 2.5% y el tiempo de secado previo de 2 a 3 horas a 60-85°C.

1.5.6. Poliuretano

Es un material que se encuentra en color natural (inoloro y opaco) y presenta buenas propiedades de alta resistencia a la tracción, al desgaste y al desgarre. Se puede utilizar en piezas donde se requiera exactitud y buena resistencia. La temperatura máxima a la que se puede trabajar sin prejuicios es de 88°C y presenta inestabilidad frente a ácidos concentrados, además, tiene un olor irritante y se puede considerar un factor de contracción de 0.9 a 1%.

1.5.7. Polietileno de baja presión (PEHD)

Las propiedades que presenta este material se describen a continuación: alta rigidez; dureza superficial; resistente a la ebullición y esterilizable; insípido e inodoro; conductividad térmica (λ) de 0.33 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20 °C de 0.94 a 0.96 g/cm³; bajo ciertas circunstancias el tiempo de secado previo de 1 a 1.5 h a 65°C y presenta una contracción de 2 a 4%.

1.5.8. Polietileno de alta presión (PELD)

Se puede utilizar para la fabricaron de recipientes de embalaje frascos flexibles, aparatos médicos y juguetes. En cuanto a sus propiedades generales presenta: insípido, inodoro e inoloro; tonos de color transparente y opaco; alta flexibilidad; buena resistencia térmica; baja dureza superficial; conductividad térmica (λ) 0.26 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20 °C de 0.92 a 0.94 g/cm³; calor específico (c) 0.5 kcal/kg°C; bajo ciertas circunstancias el tiempo de secado previo de 1 a 1.5 h a 65 °C y presenta una contracción de 1.5 a 3%.

1.5.9. Polipropileno (PP)

Se presenta como masa granulada, incolora, transparente y oscura. En cuanto a sus propiedades generales presenta: resistencia a la tracción y rigidez, además buena dureza superficial sin tendencia a la corrosión; es esterilizable a 120°C y se puede utilizar a una temperatura máxima de 130°C, pero quebradizo a temperaturas menores a 0°C; conductividad térmica (λ) de 0.26 kcal/mh°C; densidad (ρ) a 20°C de 0.91 g/cm³; calor específico (c) 0.46 kcal/kg°C; tiempo de secado previo de 1 a 1.5 h a 75°C; presenta una contracción de 1.2 a 2.5% considerando una buena fluidez [3].

1.5.10. Polibutileno Teraptalato (PBT)

Termoplástico semicristalino con una resistencia elevada y una estabilidad termo-dimensional elevada. Otros beneficios son una tenacidad elevada, aun en frío, un buen comportamiento deslizante y de desgaste (menos de 54°C), una absorción de humedad baja y una expansión térmica baja. La alta cristalinidad de PBT le da resistencia química excelente a la mayoría de los solventes orgánicos. Algunas aplicaciones son las siguientes: máquinas de escribir, botones del teclado de la computadora, engranajes, levas, y bujes; bobinas y rotores eléctricos; empalmes eléctricos; distribuidores y arrancadores automotriz [22,23].

1.6. MOLDES DE INYECCIÓN

Un molde es un arreglo ensamblado de una o más cavidades con la forma de la pieza deseada, y se conforma de dos mitades que se fijan en los platos del portamolde de la máquina de inyección. Estos dos elementos en el molde son lado inyector y la otra mitad es el lado extractor [1]. En la figura 1.4 se muestra la designación de cada uno de los elementos de un molde de inyección de plásticos.

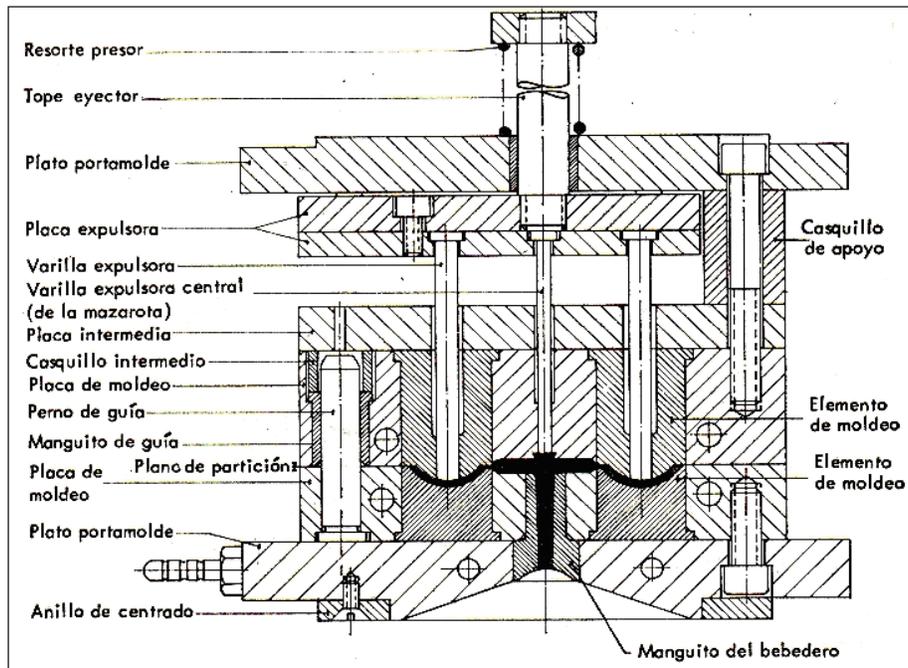


Figura 1.4. Configuración de un molde [1].

Las funciones del molde consisten en recibir la masa plástica, distribuirla, darle forma, enfriarla y realizar la extracción de la pieza.

El material que viene del cilindro de plastificación llega a la boquilla de inyección, recorriendo un sistema de canales de flujo, para distribuirla y dirigirla a la cavidad de molde. El sistema de alimentación básicamente comprende tres puntos: El bebedero, la “araña” (distribuidor de colada) y canales de estrangulamiento.

1.6.1. Elementos del molde

1.6.1.1. Mazarota, vela o colada

La mazarota comprende la unión del molde con la unidad de inyección de la máquina, partiendo del canal de distribución.

1.6.1.2. Venas de distribución

Las venas de distribución conducen el material de moldeo hacia la cavidad del molde, lo más rápido posible y por el camino más corto, sin obstáculos y sin que se presenten pérdidas de calor y presión. Esto se hace con los canales de distribución para conseguir que el material penetre en todas las cavidades simultáneamente, además, el canal circular produce las mínimas pérdidas de calor y por rozamiento. El sistema de distribución de “araña” o “estrella” (Fig. 1.5.2, 1.5.3 y 1.5.4) permite obtener vías de flujo iguales, disponiendo de cavidades en círculo alrededor del punto central del bebedero. El sistema de hilera consta de un canal principal y diversos canales secundarios que terminan en el canal de estrangulamiento (Fig. 1.5.1).

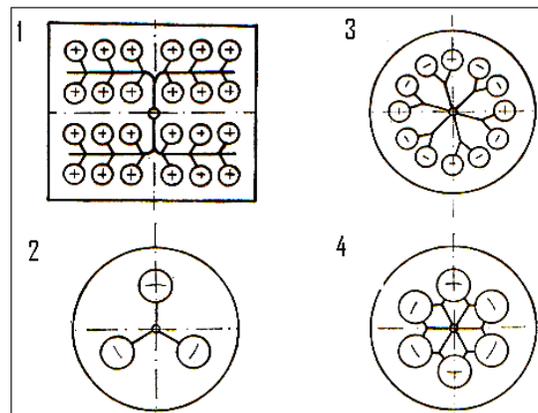


Figura 1.5. Canal distribuidor de hilera (1). Canal distribuidor en estrella (2, 3, 4).

1.6.1.3. Punto de inyección

El punto de inyección es el lugar donde se unen las venas de inyección y la cavidad. A continuación se describen puntos de inyección que se pueden adaptar bajo determinadas situaciones:

- a) Inyección capilar: Puede ser realizada en combinación con el molde sin colada con un diseño especial con la boquilla.
- b) Inyección por diafragma: Adecuado para piezas cilíndricas que requieren buena concentricidad (Fig. 1.6.A)

- c) Inyección submarina: Permite el corte automático de la colada al momento de expulsar la pieza (Fig. 1.6.B)
- d) Inyección de película: Adecuada para piezas planas o de superficie amplia, donde la distorsión se reduce al mínimo (Fig. 1.6.C).
- e) Inyección de abanico: Usado para piezas planas y delgadas, asegurando una distribución uniforme del polímero (Fig. 1.6. D).
- f) Inyección lateral: Variante de inyección de película o de abanico.
- g) Inyección de estrella o radial: Para artículos tubulares que no requieren tolerancias cerradas (Fig. 1.6.E).
- h) Inyección de lengüeta: Adecuada para lentes ópticos y piezas planas (Fig. 1.6.F).
- i) Inyección de anillo: Se utiliza para artículos tubulares y permite que el material se distribuya alrededor del corazón antes de llenar completamente el molde (Fig. 1.6.G).
- j) Inyección cónica: Facilita el flujo del material alrededor del corazón, posicionándolo en la cavidad [4].

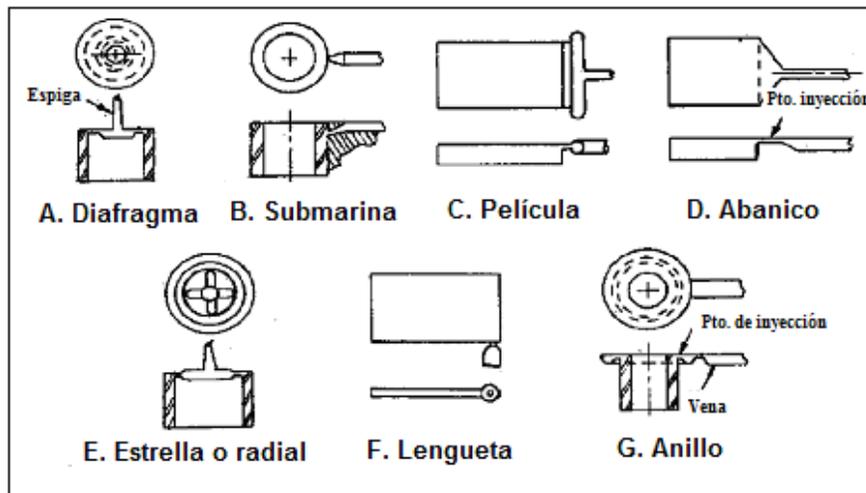


Figura 1.6. Puntos de inyección [5].

1.6.2. Clasificación de moldes de inyección

Los moldes se pueden clasificar de acuerdo a las características de diseño y a las características del moldeo de partes, enumeradas a continuación:

1.6.2.1. Tipo de colada

a) *Moldes de colada fría*: Los moldes de colada fría son utilizados para inyectar piezas de tamaño pequeño o mediano, en dos o más cavidades. Estos moldes no necesitan resistencias eléctricas, termocontroles o sensores.

b) *Moldes de colada caliente*: Estos moldes se utilizan para inyectar todo tipo de piezas. A diferencia de los moldes de colada fría, en estos moldes todo el material que se inyecta se convierte en producto.

1.6.2.2. Tipo de número de cavidades

a) *Moldes de una sola cavidad*: Se puede evitar el desperdicio de la colada cónica que solidifica en el bebedero de inyección. Esta inyección capilar deja en las piezas moldeadas una pequeña marca que corresponde al diámetro del punto de inyección (Fig. 1.7.C y 1.7.D) [4].

b) *Moldes de cavidades múltiples*: El material fundido entra por la zona central del molde, haciendo un recorrido por los canales de alimentación para llegar a las cavidades dispuestas. (Fig. 1.7.A y 1.7.B) [4].

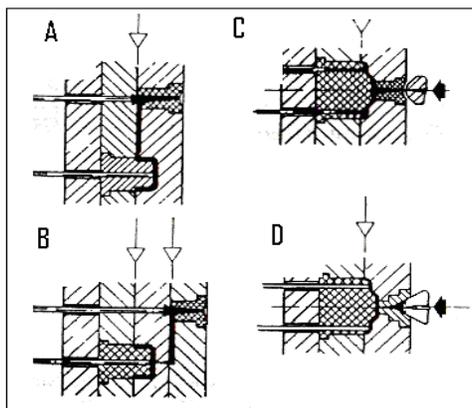


Figura 1.7. Sistema de alimentación para: Moldes de cavidad múltiple (A y B) y moldes de una cavidad (C y D). (A) Molde con dos placas (con inyección lateral tipo túnel). (B) Molde con tres placas (inyección central capilar). (C) Inyección de cono. (D) Inyección capilar con cono invertido.

1.6.2.3. Tipo de canales de enfriamiento

A continuación se describen el tipo de canales de enfriamiento para el control de temperatura de moldes.

a) *Moldes con sistema de enfriamiento en espiral*: Se utiliza para piezas planas, con simetría de rotación, donde el líquido refrigerante actúa sobre el punto situado frente a la entrada de la colada, consiguiéndose la diferencia de temperatura entre la pieza y el líquido (Fig. 1.8.A) [1].

b) *Moldes con sistema de enfriamiento rectilíneo*: Cuando las piezas son rectangulares, el sistema cruza el molde y de este modo no puede garantizar una distribución uniforme de la temperatura. (Fig.1.8.B y 1.8.C).

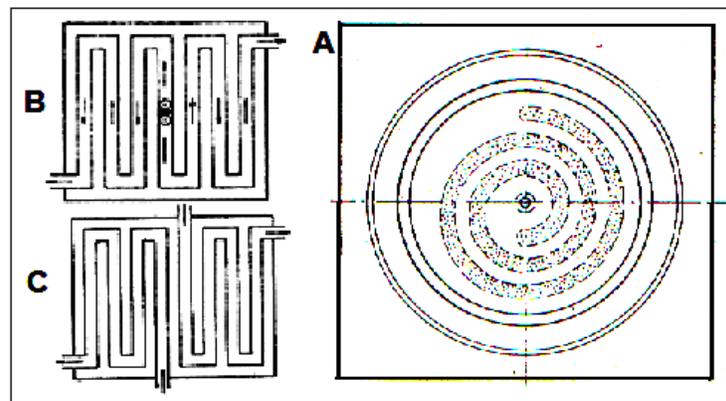


Figura 1.8. A) Disposición en espiral de los canales de refrigeración. B) Disposición rectilínea de los canales de refrigeración con acceso central, frente a la colada. C) Disposición rectilínea de los canales de refrigeración con entradas contrapuestas.

1.6.2.4. Tipo número de placas

a) *Dos placas*: En este caso, una de las placas es la cavidad que se encuentra fija y la otra es la de placa de corazón.

b) *Tres placas*: Permite la distribución del plástico más extendida a los diferentes puntos de inyección y consiste en una placa central para ayudar a botar la pieza arrancando la colada por separado sin necesitar alguna operación secundaria.

1.6.2.5. Tipo de desmoldeo

Una vez enfriada y solidificada la pieza, hay que desmoldearla. Por lo general los dispositivos de desmoldeo se accionan mecánicamente, aprovechando la carrera de apertura de la máquina, cuidando que la pieza quede en la parte móvil del molde. Según el tipo de desmoldeo, los moldes se dividen en [1]:

a) *Moldes para piezas con resaltes*: Para este tipo de moldes se requiere un plano de partición adicional. Los moldes se construyen entonces, de forma que permitan que una parte de la matriz se desplace lateralmente.

b) *Moldes de corredera y núcleos móviles*: Este tipo de molde es utilizado para la fabricación de piezas con entalladuras (salientes, nervios, perfiles, roscados) o aberturas no paralelos al eje de movimiento de la unidad de cierre [3].

c) *Moldes para roscas*: Las piezas con rosca producen problemas en el desmoldeo, por la entalladura de la rosca y exigen moldes especiales. El desmoldeo se puede hacer con los moldes para roscas descritos a continuación:

1. *Moldes desenroscables*: El núcleo tiene la forma de un elemento roscado y se desmoldea desenroscando el núcleo de forma manual o automática.
2. *Moldes para piezas roscadas con accionamiento por cremallera*: Este tipo de moldes se utilizan para transformar el movimiento de giro de los núcleos [1].
3. *Moldes para piezas roscada, con accionamiento independiente*: Para roscas largas, la carrera del movimiento de apertura de un molde, no es suficiente para desmoldear la rosca, entonces las piezas roscadas se desmoldean a base de un accionamiento independiente (motores eléctricos, motores hidráulicos o neumáticos en combinación con una cremallera) [1].

CAPÍTULO 2

PROBLEMAS DE INYECCIÓN Y REFUERZOS PARA PIEZAS DE PLÁSTICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Partiendo de la premisa que es frecuente que las piezas moldeadas no cumplan con las especificaciones pre-establecidas de diseño, en este capítulo se estudiarán las causas y posibles soluciones de problemas que pueden surgir durante el proceso de inyección, considerando los siguientes puntos: el molde, el medio ambiente, la máquina de inyección y las variables de proceso: presión, tiempo, temperatura y velocidades.

Además, se estudiarán los refuerzos que se pueden utilizar en piezas de material plástico, con el fin de aumentar su rigidez. Los elementos usados como refuerzos son: costillas, costillas en forma circular (que sirven como alojamiento y sujeción para elementos de fijación [1]) y los cartabones.

2.2. DESCRIPCIÓN, CAUSA Y POSIBLE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INYECCIÓN

A continuación se describen los problemas de inyección más comunes y las posibles soluciones en el moldeo por inyección:

2.2.1. Marcas de hundimiento (*rechupes*): La pieza tiene bajo llenado o tiene excesiva contracción en la sección gruesa.

Posible solución:

- Incrementar la cantidad de material a inyectar.
- Incrementar la cavidad o presión de cierre.
- Temperatura del molde demasiado alta.
- Incrementar tiempo de cierre (incremento de tiempo de enfriamiento).
- Enfriar el área del hundimiento.

- Abrir puntos de inyección.
- Reducir el espesor de la pared de intersección con la costilla.

2.2.2. Huecos: La pieza tiene bajo llenado o excesivo encogimiento.

Posible solución:

- Aumentar cantidad de material.
- Aumentar presión de inyección.
- Verificar y limpiar el sistema de refrigeración del molde.
- Limpieza del sistema de venteo.

2.2.3. Encogimiento: Disminuye el volumen a medida que se enfría el plástico o insuficiente tiempo de enfriamiento.

Posible solución:

- Incrementar la presión de la cavidad.
- Incrementar tiempo de cierre (incremento de tiempo de enfriamiento).
- Las venas de distribución o punto de inyección demasiado pequeños.
- Variación del espesor de la pared.
- Aumentar la segunda presión (presión de mantenimiento).

2.2.4. Rechupes: Los rechupes tienen lugar durante el proceso de enfriamiento, si la contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas; solidificación demasiado lenta; tiempo de presión de mantenimiento demasiado corto e insuficiente transferencia de la presión de mantenimiento.

Posible solución:

Para una transferencia óptima de presión de mantenimiento (segunda presión), las piezas deben inyectarse en las partes más gruesas.

2.2.5. Ráfagas: Existen tres tipos de causas en el caso de ráfagas: Las ráfagas por quemaduras (debidas a la degradación térmica de la masa); por humedad y por color (cuando se colorea con pigmentos, el defecto puede darse debido a una disolución incompleta de las partículas de pigmento en la masa).

Posible solución:

- Inyectar “al aire” a fin de comprobar la temperatura de fusión.
- Debe asegurarse de que el sustrato sea compatible con el plástico a colorear.
- En el caso de ráfagas por quemaduras, es necesario verificar que la temperatura no sea demasiado alta o tiempo de permanencia demasiado prolongado durante el presecado; disminuir la temperatura de la masa; disminuir el tiempo de permanencia en la unidad de plastificado, disminuir la velocidad de inyección y las revoluciones por minuto (rpm).
- La posible solución respecto a las ráfagas por humedad, radica en cuidar que el sistema de control de temperatura no pierda agua por el molde; insuficiente secado previo del material y almacenamiento del material en las condiciones óptimas.

2.2.6. Las líneas de soldadura: Las líneas de soldadura se originan cuando se encuentran dos o más frentes de flujo. El frente de flujo redondeado de la masa queda aplastado y unido cuando se tocan. Existen algunas otras causas por ejemplo, que el molde y el plástico estén fríos, variación del espesor de las piezas, baja velocidad de inyección y sistemas de venteo inadecuado.

Posible solución:

- Se podrán obtener mejoras significativas a través de altas temperaturas en las paredes del molde, pero debe tenerse en cuenta que aumentando la temperatura de la pared del molde se incrementa el ciclo de trabajo en aproximadamente un 2% por °C [1].
- Aumentar presión de inyección [2].
- Rediseño de la pieza o de la entrada del material a la cavidad [2].
- Aumento de velocidad de inyección.
- Limpieza de sistemas de venteo [2].

2.2.7. Efecto de surco de disco: El efecto de surco de disco se debe básicamente a una alta velocidad de enfriamiento, producida por:

- Temperatura del material baja.
- Velocidad de inyección baja.
- Temperatura de la pared del molde baja.

Posible solución:

Aumento del perfil de temperatura del molde, material y velocidad de inyección.

2.2.8. Piezas incompletas: La principal causa se refiere al poco volumen de material inyectado, además de impedir el flujo de la masa por problemas de obstrucción de aire, insuficiente presión de inyección y enfriamiento prematuro de una sección del canal.

Posible solución:

- Aumentar cantidad de material
- Aumentar presión de inyección.
- Verificar y limpiar el sistema de refrigeración del molde.
- Limpieza del sistema de venteo.

2.2.9. Rebabas: Se pueden atribuir algunas causas a este problema como lo son:

- Insuficiente fuerza de cierre de la máquina.
- Presiones interiores del molde altas, la presión de inyección es tan alta que el material se ve desplazado incluso dentro de ranuras muy pequeñas.
- Viscosidad baja del material, presiones internas del molde demasiado altas y poca resistencia al flujo favorecen la formación de rebabas [1].
- Alimentación excesiva de material [2].

Posible solución:

- Verificar calibración del molde para su cierre.
- Aumentar la presión de cierre.
- Verificar si la máquina es adecuada para la presión necesaria de la pieza a inyectar.
- Disminuir la presión [2].

2.2.10. Marcas de expulsión visibles: Existen diferentes causas relacionadas con el proceso:

- Causas mecánicas: Mal diseño del molde, de la pieza o del sistema de desmoldeo.
- Causas térmicas: Grandes diferencias de temperatura entre el expulsor y la pared del molde.
- Demasiada fuerza de expulsión.

Posible solución: Verificar temperatura del molde y la fuerza de expulsión.

2.2.11. Dificultad de extracción de la pieza: Existen algunas causas que ocasionan que sea difícil la extracción de las piezas, por ejemplo: piezas demasiado frías, excesivo empaquetamiento del material, material inadecuado, defectos en el molde (acabado o diseño) y falta de ángulo de salida [2].

Posible solución:

- Regular la temperatura del molde.
- Disminuir la presión de empaquetamiento.
- Cambiar de material a uno de menor fluidez [2].
- Posible recubrimiento superficial del molde.
- Rectificar la superficie del molde.
- Verificar y/o corregir el ángulo de salida.
- Cambiar molde en última instancia [2].

- El total de la fuerza de desmoldeo aplicada es alta y debe mantenerse baja [1].

2.2.12. Líneas de flujo: El material frío se forma cuando solidifica la masa en la entrada o en la boquilla antes de inyectar y de transportar la masa al interior del molde. Si los trozos fríos no se vuelven a fundir, formarán marcas que aparecerán como colas de cometa, pudiéndose esparcir por toda la pieza. [1]

Posible solución:

- Elevar la temperatura del molde y verificar que los canales de alimentación para el enfriamiento del molde no se encuentren obstruidos.
- Rectificar la boquilla.
- Limpieza de los canales.
- Aumentar la dosificación [2].

2.2.13. Formación de burbujas: Existen diferentes causas en la formación de burbujas como se describen a continuación: plástico en el molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes [2]; humedad en el material [2]; vacuolas y temperatura desigual en el molde.

Posible solución:

- Aumentar la alimentación, el tamaño del punto de inyección y la presión de inyección [2].
- Secado adecuado del material antes de su procesamiento [2].
- Verificar que los canales de alimentación para el enfriamiento del molde no se encuentren obstruidos [2].
- En el caso de vacuolas (rechupes internos) seguir el mismo procedimiento que para rechupes externos.

2.2.14. Alabeo, pandeo, torcido: El material es inadecuado, el diseño del molde es deficiente y las temperaturas de procesamiento son inadecuadas [1].

Posible solución:

- Cambio de material a uno con mayor fluidez.
- Cambiar el lugar de punto de inyección en la entrada y mejorar el pulido del molde.
- Aumentar temperatura del material y el tiempo de enfriamiento [1].
- Considerar cambios bruscos en la sección del diseño de la cavidad.

2.3. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN, TEMPERATURA Y TIEMPO

Durante el proceso de inyección existen variables como la presión de inyección, velocidad de inyección y tiempo de enfriamiento. Estas variables son dependientes e influyen directamente en el proceso de inyección. En la literatura podemos encontrar la influencia de una variable, mientras las demás permanecen constantes.

La tabla 2.1 describe las causas de los problemas más comunes y con ello, la variable a la que esta asociado dicho problema. El signo “+” representa el incremento del valor de dicha variable y el signo “-” representa disminuir el valor de dicha variable.

Tabla 2.1. Causas de problemas en piezas de moldeo referidas a una variable.

CAUSA DE PROBLEMA	VARIABLES QUE INFLUYEN (PRINCIPALMENTE)
<p>*Excesivo empaquetamiento (dificultad de extracción de la pieza) (+).</p> <p>*Llenado lento del molde (+).</p> <p>*Mala distribución en el premezclado (+ contrapresión).</p> <p>*Plástico del molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes (+).</p> <p>*Presión elevada (rebaba) (-).</p> <p>*Maquina no adecuada para la presión necesaria de la pieza.</p> <p>*Baja presión de inyección (+).</p> <p>*Insuficiente carga del material (+).</p> <p>*Plástico demasiado frío (+).</p> <p>*Choque de dos o más frentes de flujo (+).</p> <p>*El material no llena el molde en el tiempo establecido (+).</p> <p>*Disminuye el volumen a medida que se enfría y cristaliza el plástico, para encogimiento excesivo (+) y contracción insuficiente (-).</p> <p>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (+).</p> <p>*Encogimiento de la pieza (+ la segunda presión).</p>	<p>Presión</p>

<p>*Entrada o boquilla estrecha (-).</p> <p>*Inyección lenta (+).</p> <p>*Alta velocidad de enfriamiento (+).</p> <p>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (-).</p>	Velocidad de inyección
<p>*Temperaturas de procesamiento inadecuadas ocasionando deformación (+).</p> <p>*Por no enfriar completamente la pieza antes de liberarla del molde (encogimiento excesivo (+) y encogimiento insuficiente (-)).</p>	Tiempo de enfriamiento
<p>*Temperatura inadecuada de trabajo (pandeo después del enfriamiento) (+).</p> <p>*Temperatura desigual (burbujas internas) (-).</p> <p>*Enfriamiento prematuro en una sección (+).</p> <p>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (+).</p> <p>*Piezas demasiado frías.</p> <p>*La resina entra fría al molde.</p> <p>*Llenado lento del molde.</p> <p>*Canales de enfriamiento del molde obstruidos.</p> <p>*Molde frío (rupturas, grietas o líneas de flujo).</p> <p>*Material sobrecalentado (+).</p> <p>*No enfriar completamente la pieza antes de sacarla del molde.</p> <p>*Excesiva contracción debido a la baja temperatura del molde.</p> <p>*Insuficiente contracción debido a la alta temperatura del molde.</p>	Temperatura del molde durante el proceso

<p>*El material entra frío en el molde.</p> <p>*Llenado lento del molde.</p> <p>*Material sobrecalentado.</p> <p>*Temperaturas de procesamiento inadecuadas (+).</p>	<p>Temperatura del material de inyección</p>
<p>*Resina entra fría al molde.</p> <p>*Llenado del molde muy lento.</p>	<p>Temperatura de la boquilla</p>
<p>*Molde defectuoso (mecánico).</p> <p>*Colorante inadecuado (material).</p> <p>*Plástico del molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes (diseño y material).</p> <p>*Secado inadecuado del material antes de su procesamiento (mecánico).</p> <p>*Excesiva alimentación del material (mecánica).</p> <p>*Máquina inadecuada según la presión necesaria de la pieza a inyectar (diseño).</p> <p>*Canales de inyección obstruidos (técnicos).</p> <p>*Diseño deficiente del molde (diseño).</p> <p>*Sistema de refrigeración en malas condiciones (técnicos).</p> <p>*Variación de espesor de las piezas (diseño).</p> <p>*Ductos de máquina de inyección sucios (técnicos).</p> <p>*Considerar cambios bruscos en la sección del diseño de la cavidad (diseño).</p> <p>*Si existe dificultad para la extracción de la pieza, verificar y/o corregir el ángulo de salida y para el caso de las marcas visibles, verificar la fuerza de expulsión (-).</p>	<p>Otros</p>

2.4. REFUERZOS PARA PIEZAS DE MATERIAL PLÁSTICO

La tabla 2.1 muestra una gran variedad de problemas debido a los parámetros de inyección, diseño y manufactura, sin embargo, existen otras causas que provocan un mal funcionamiento en las piezas de plástico. Estas aparecen normalmente cuando se presenta una sustitución de material (metal por plástico), o un cambio en el material de inyección, es decir, cambio en el uso de la pieza. Lo anterior ocasiona que el plástico presente condiciones extremas de flexión y torsión.

Aumentar los espesores para reforzar la pieza, es una solución que no se debe aplicar, ya que esto incrementa la posibilidad de encogimiento de la pieza. Entonces, para reforzar las piezas de plástico, se propone el diseño de refuerzos, para que el material inyectado cumpla con los requerimientos mecánicos, en conjunto, con una buena calidad dimensional. Para lograr lo anterior, es necesario aumentar la rigidez, definida, como la capacidad de un elemento a no deformarse, flexionarse o torcerse, al aplicar una fuerza exterior. Existen tres tipos de refuerzos:

- a) Costillas: Elementos con ciertas características geométricas que se colocan en componentes plásticos, con el fin de obtener mayor rigidez.
- b) Costillas en forma circular: Se usan en conjunto con las costillas y puede servir como alojamiento de elementos de fijación.
- c) Cartabones: Elementos en forma de triángulo rectángulo isósceles que se utilizan para contrarrestar fuerzas laterales.

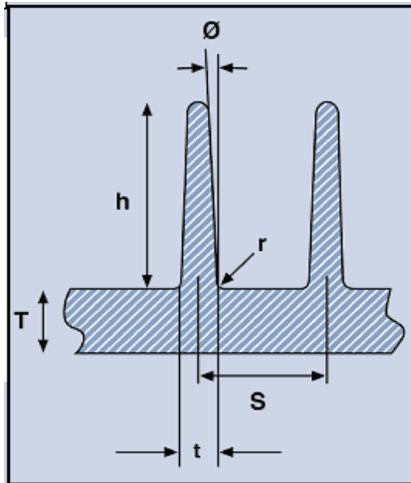
2.4.1. COSTILLAS

La ventaja del uso de costillas radica principalmente en: el aumento de rigidez (colocadas a lo largo del eje de flexión, a fin de proporcionar la menor deformación [3]); reducción de masa; se acortan los tiempos de ciclos de moldeo e integridad estructural de la inyección de piezas de plástico moldeado sin crear paredes de gran espesor.

2.4.1.1. Recomendaciones de diseño para costillas

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros de costillas, donde empresas fabricantes de plásticos, proporcionan recomendaciones de acuerdo a su experiencia en el campo de estudio de materiales

termoplásticos de ingeniería. Los parámetros que se consideran de acuerdo a la geometría de la costilla son los siguientes (Fig. 2.1):



T: Espesor de la pared.

θ : Ángulos situados en la parte más alta de la costilla.

h: Altura.

t: Espesor de costillas.

r: Radio de filete en la base de la costilla.

S: Distancia entre costillas.

Figura 2.1. Parámetros de costillas [9].

Tabla 2.2. Parámetros de costillas.

EMPRESA	ÁNGULO “ θ ” (°)	ALTURA “H” [NÚMERO DE VECES EL ESPESOR DE LA PARED]	ESPESOR DE COSTILLAS “T” [% DEL ESPESOR DE PARED NOMINAL]	RADIO DEL FILETE EN LA BASE DE LA COSTILLA “R” [% DE ESPESOR DE LA PARED NOMINAL]	DISTANCIA ENTRE COSTILLAS “S” [NÚMERO DE VECES EL ESPESOR DE LA PARED]
TICONA	1.5 – 3 *	1.5 – 5	50	No especificado	Mínimo 2
GE	1.5-3 *	Máximo 3	50 - 60	25-50	Mínimo 2
DUPONT	**	Máximo 3	50 ***	50	No especificado
DSM	*	Máximo 3	50	25-50	Mínimo 2
EFUNDA [12]	No especificado	Máximo 3	40 - 60	Mínimo 25	Mínimo 2

*Angulo mínimo de 0.5° .

**Se puede considerar los siguientes ángulos para las siguientes aplicaciones:

1. Diseño por apariencia: $\frac{1}{4} - \frac{1}{2}^\circ$.
2. Diseño para estructura: $\frac{1}{4} - \frac{1}{2}^\circ$.
3. Diseño para moldeado de espuma: 1° .

***Se puede considerar los siguientes espesores de costillas en relación al espesor de la pared para las siguientes aplicaciones:

1. Diseño por apariencia: 40%.
2. Diseño para estructura: 60%.
3. Diseño para moldeado de espuma: 100%.

Aunado a las anteriores recomendaciones existen guías de diseño referentes a las posibles geometrías a utilizar, tal es el caso de TICONA [7] que muestra 8 posibles recomendaciones y Malloy [5] que muestra 4 configuraciones.

2.4.1.2. Unión de costillas con perfil de pared

Para el máximo rendimiento del uso de costillas, en la unión de estas con el perfil de la pared, se debe unir en el mismo punto (Fig. 2.2.A). La violación de esta norma dará lugar a geometrías débiles. Si las costillas diagonales se mueven ligeramente, la rigidez se reduce un 35% (Fig. 2.2.B) y si una costilla corta vertical, se añade a un costado de la pared de la pieza, la rigidez torsional se reduce un 5% adicional (Fig. 2.2.C) [6,9].

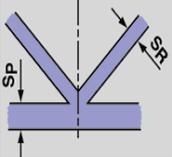
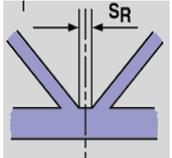
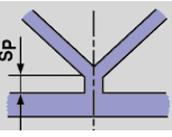
VARIANTES	RIGIDEZ EN %	RESISTENCIA DE ESFUERZO EN %
<p>A</p> 	100	100
<p>B</p> 	65	80
<p>C</p> 	60	82

Figura 2.2. Unión de líneas de costillas y perfil de pared. A. Configuración de costillas cruzadas con el máximo rendimiento torsional. B. Configuración de costillas cruzadas con una reducción del 35% del rendimiento total. C. Configuración de costillas cruzadas con una reducción del 40% del rendimiento total [9].

2.4.2. COSTILLAS EN FORMA CIRCULAR Y CARTABONES

Además de las costillas, existen otros métodos aceptables para el mejoramiento de propiedades en secciones de plástico, como las costillas en forma circular (que además sirven como alojamiento para elementos de fijación [6]) y se utilizan en conjunto con las costillas cuando las fuerzas laterales son esperadas (Fig. 2.3).

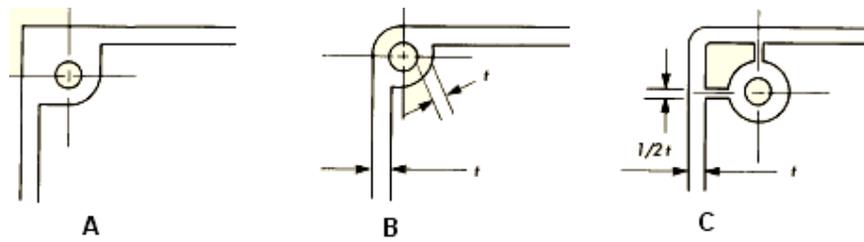


Figura 2.3. A. Diseño pobre no recomendado. B. Ubicación aceptable. C. Ubicación aceptable [8].

Los cartabones son elementos en forma de triángulo rectángulo isósceles que se utilizan para contrarrestar fuerzas laterales, en conjunto con las costillas de forma circular (Fig. 2.4).

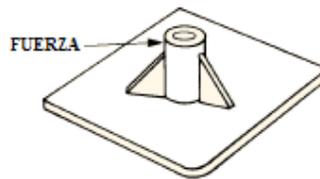


Figura 2.4. Ubicación y configuración cartabones [8].

2.4.2.1. Recomendaciones de diseño para costillas en forma circular y cartabones

En la tabla 2.3 se muestra las recomendaciones para la selección de parámetros de costillas en forma circular y cartabones (Fig. 2.5), donde empresas fabricantes de plástico, proporcionan sus parámetros de acuerdo a su experiencia en el campo de estudio.

t = Espesor de la pared.

w = Espesor de la costilla circular.

d = Diámetro del núcleo.

D = Diámetro exterior de la costilla circular.

h = Altura de la costilla circular.

θ = Angulo exterior de la costilla circular (“D”).

r = Radio de la base de la costilla circular (parte externa).

e = Altura máxima del cartabón.

f = Longitud del cartabón.

j = Espesor de la base del cartabón.

M = Radio del fondo de la cavidad.

S = Porción de la pared en el fondo de la cavidad.

T = Espesor de costillas.

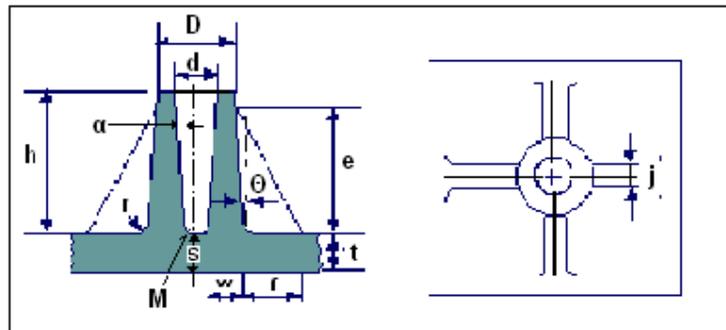


Figura 2.5. Parámetros de costillas circulares y cartabones [14].

Tabla 2.3. Parámetros de costillas circulares y cartabones.

PARÁMETRO/EMPRESA	DUPONT	GE	TICONA	DSM	EFUNDA
w (mm) Respecto al espesor de "t"	0.6t	Máximo 0.6t		Máximo 0.5t	Menor o igual de 0.6t
D (mm)	2d	2d			2D
h =Altura del boss	2.5d	Máximo 3D.		3t	Máximo 5t
θ °		Mínimo 1/2°	1/2°	Mínimo 0.5°	θ °
α °		1/4°	1/2°	Mínimo 0.5°	
r	Radio de 0.08128- 0.1574 mm	25-50t	Radio mínimo de 0.0127mm	0.25t	r
E (mm)		Máximo 4t Mínimo 2t		0.95t	E
F (mm)		1.5t		Mayor o igual a 2t	
J (mm)		0.5t		0.5-0.7t	
L (Respecto a t)		Mínimo 2t		2t	
S	0.6t		0.5t	0.5t	Menor de 0.7t
T	0.6t para t menor de 1/8" y 0.4t para t mayor de 1/8"		0.5t		
M	Radio de 0.08128- 0.1574 mm	0.25t-50t Mín.0.381mm	0.5°		

Para configuraciones de costillas en forma circular cercanas a una pared, se utilizan los mismos parámetros de la tabla 2.3, pero considerando una distancia de la costilla circular a la pared de $g=0.5 D$ [14], con un mínimo de 3.175 mm (Fig. 2.6) [10].

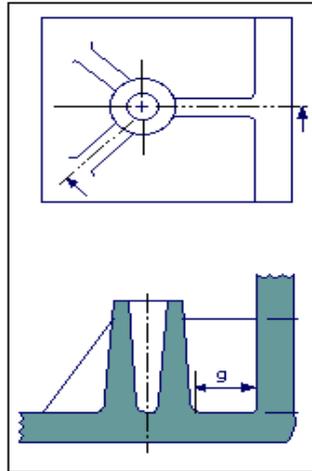


Figura 2.6. Distancia de la costilla circular a una pared [16].

2.4.2.2. Recomendaciones de fabricantes de tornillos

Cuando las costillas en forma circular se han diseñado como alojamiento para elementos de fijación como los tornillos, el diámetro interior y el espesor de la pared debe ser controlada para evitar una excesiva acumulación de esfuerzos en el diámetro de la costilla circular. Las recomendaciones para costillas en forma circular con cuerda para tornillos, se enlistan a continuación [10]:

- El diámetro interior “d” de la costilla circular debe ser el 80% del diámetro nominal del tornillo.
- El ajuste de tornillo debe ser mínimo de 2.5 veces el diámetro del tornillo. Con ajustes de longitudes más cortas existe el riesgo del despojo de la cuerda durante el ensamble del tornillo o al sacarlo.
- La profundidad del núcleo de la cavidad debe ser de 0.813mm, mayor que la longitud del tornillo. Esto evita que el tornillo toque fondo causando la desaparición de esfuerzos y

permitiendo espacio para el desplazamiento del material que empuja el tornillo con el corte de su cuerda.

- Se recomienda un chaflán en la parte superior de la costilla circular.

La máxima fuerza al introducir o sacar el tornillo F_{\max} en la rosca de la costilla circular y el máximo esfuerzo S_{\max} que ocurre en el diámetro interior de la costilla circular, se definen por las siguientes ecuaciones (Fig. 2.7) [16]:

$$F_{\max} = \frac{\mu\pi\delta L}{\frac{1}{E_b} \left[\frac{O_b^2 + I_b^2}{O_b^2 - I_b^2} + \nu_b \right] + \frac{1}{E_t} (1 - \nu_t)}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{\mu\pi L I_b} \left[\frac{O_b^2 + I_b^2}{O_b^2 - I_b^2} \right]$$

Donde:

F_{\max} = Máxima fuerza de inserción.

T_{\max} = Esfuerzo máximo.

O_b = Diámetro exterior de la costilla circular.

I_b = Diámetro interior de la costilla circular.

ν_b = Cociente de Poisson de la costilla circular.

E_b = Módulo de Elasticidad de la costilla circular.

E_i = Módulo de Elasticidad del inserto.

ν_i = Cociente de Poisson del inserto.

μ = Coeficiente de fricción (usualmente de 0.35 a 0.55 para los plásticos).

δ = Interferencia de diámetros $O_i - I_b$.

O_i = Diámetro exterior del inserto.

L = Longitud de ajuste.

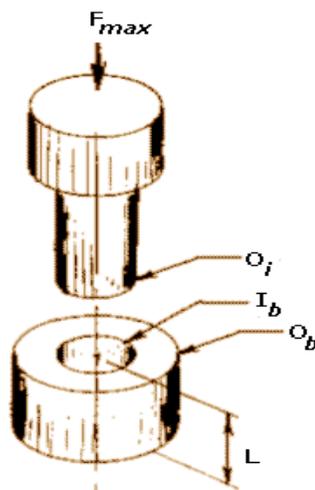


Figura 2.7. Inserción de tornillo en una costilla circular [16].

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología y análisis del trabajo, para validar la rigidez en piezas de material plástico (mostrando las consideraciones, análisis, parámetros y resultados pertinentes) con la implantación de costillas como refuerzos, en conjunto, con la evaluación de moldeabilidad de las piezas en estudio.

Con el fin de verificar la convergencia de resultados de simulación de análisis de elemento finito, se realizó la validación del software UG-NX5. Esta validación se hizo para una barra en cantilever y consta de valores teóricos, valores del software Nisa-Display y resultados obtenidos en una barra en cantilever UG-NX-5.

3.2. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE

Para validar y verificar la convergencia de los resultados de UG-NX5 en este trabajo, se realizó una comparación de resultados, entre los valores teóricos, los valores proporcionados por el software Nisa-Display [11] y los valores obtenidos en UG-NX5. En la Tabla 3.1 se muestran los resultados del análisis de viga en cantilever, sujeta a una fuerza puntual de 1000 N. Las dimensiones de la viga fueron de 1000 x 30 x 30 mm, considerando un acero con $E=207$ GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3.

Tabla 3.1. Relación de resultados y porcentajes de error.

	<i>Esfuerzo [N/mm²]</i>	<i>% Error</i>	<i>Deflexión [mm]</i>	<i>% Error</i>
Teóricos	222.22		23.85638	
NISA	222.22	0.00099	23.8564	0.00005
UG-NX5	223.698	0.66	23.823	0.13992

Es necesario comentar que los resultados proporcionados por Nisa-Display están dados a partir de un elemento unifilar, mientras que en UG-NX5 se utilizó un elemento tetraedro de 10 nodos, ya que se obtiene mayor número de nodos, por lo tanto la solución será más precisa.

Los resultados muestran que los valores obtenidos en UG-NX5 tienen un error mayor (de 0.13987 % en el caso de los desplazamientos) que los resultados de Nisa-Display, sin embargo, se considera que los resultados convergen y no están alejados del valor teórico, por lo que en este trabajo se consideró que los resultados del sistema UG-NX5 son confiables.

3.3. DESARROLLO DEL MODELO

Para determinar los efectos de los parámetros que se tienen en el diseño de costillas (Capítulo 2: sección 2.4.1) se estudiaron dos parámetros en conjunto con el material, en vigas en cantilever con dimensiones iguales. Los cinco tipos de recomendaciones que se registraron en el capítulo 2, fueron obtenidos en manuales de diseño, propuestos por empresas fabricantes de plástico, por ejemplo DUPONT [6], TICONA [2, 3], GE [10] y DSM [9].

Es necesario mencionar que en este estudio se consideraron los siguientes parámetros para costillas, donde la combinación de estos definen un perfil: ángulo de salida (θ) y espesor de la costilla (t). Aunado a esto, se considera también la configuración que define la geometría del perfil (A, B, C y D).

Las razones por lo que se variaron sólo tres parámetros de costillas, son las siguientes:

- 1) Los parámetros están en función del espesor de la pared (T) y a las restricciones geométricas que se consideraron. La altura de la costilla fue preestablecida a partir de la altura total de la viga, en el que se tuviera la mínima altura de costilla, es decir, de $1.5 T$ [2,3]. Además, partiendo de la premisa de que, entre más altas sean las costillas, pueden existir problemas como: difícil llenado, se puede quedar la pieza en el molde de inyección y/o se pueden generar acumulaciones de masa de material en la base de la costilla [10].
- 2) Debido a las restricciones geométricas del ancho de la viga, el número de costillas a lo largo del eje longitudinal se limitó a tres, ya que el ancho total es 20.8 mm y la distancia mínima entre

costillas debe ser de 8 mm, por lo tanto, hay espacio para tres costillas distribuidas en la sección transversal.

- 3) En el caso de la distancia entre costillas (S), la gran mayoría de las recomendaciones de las empresas no tenían variantes en dicho parámetro, es por eso que se decidió dejarlo constante.

Los parámetros que variaron son los siguientes: ángulo de salida de 0.5° , 1.5° y 3° ; espesor de costilla (t) de 40%, 50% y 60% del espesor de “T”. Los parámetros que permanecen constantes son: la pared principal (T), con un espesor de 4 mm; la altura de las costillas se restringe a 1.5 veces el espesor de “T” ($h= 6$ mm); el radio (r) de intersección entre la costilla y la pared principal será 25% del espesor de la pared “T” ($r= 1$ mm) y finalmente, la distancia que debe existir entre dos costillas (S) es dos veces el espesor de “T” ($S= 8$ mm).

3.3.1. Configuraciones

La configuración es el arreglo de las costillas en una viga. Las configuraciones que se tomaron fueron cuatro, las más rígidas según TICONA [7]. En la figura 1, se presentan las configuraciones propuestas, analizadas como una viga en cantilever con las siguientes dimensiones: 120 x 20.8 x 10 mm, a continuación se describe cada una de las configuraciones de estudio:

1. Configuración con costillas unidireccionales.

El ancho de la sección transversal de la pared fue dividida en secciones equivalentes de acuerdo, a los parámetros preestablecidos, es decir, la distancia entre costillas fue de dos veces el espesor de “T” ($S= 2T$) (Fig. 3.1.A).

2. Configuración con costillas cruzadas.

Las costillas perpendiculares a la sección transversal de la pieza, tienen una distancia entre si, de dos veces el espesor de la pared ($S= 2T$) y las costillas perpendiculares al eje longitudinal, la distancia considerada fue el doble de lo preestablecido ($S= 4T$) (Fig. 3.1.B).

Las costillas cruzadas se utilizan para reemplazar una sección constante de pared de la pieza, por otra estructura con la misma rigidez y reducción de masa, teniendo en cuenta que este tipo de costillas a 90° , a lo largo de los ejes no son eficaces para efectos de torsión (Fig. 3.1.B) [6].

3. Configuración con costillas en V:

En esta configuración las costillas tienen un ángulo de 45° respecto al eje longitudinal (Fig. 3.1.C).

4. Configuración con costillas en X.

En esta configuración las costillas tienen un ángulo de 46° respecto al eje longitudinal (Fig. 3.1. D).

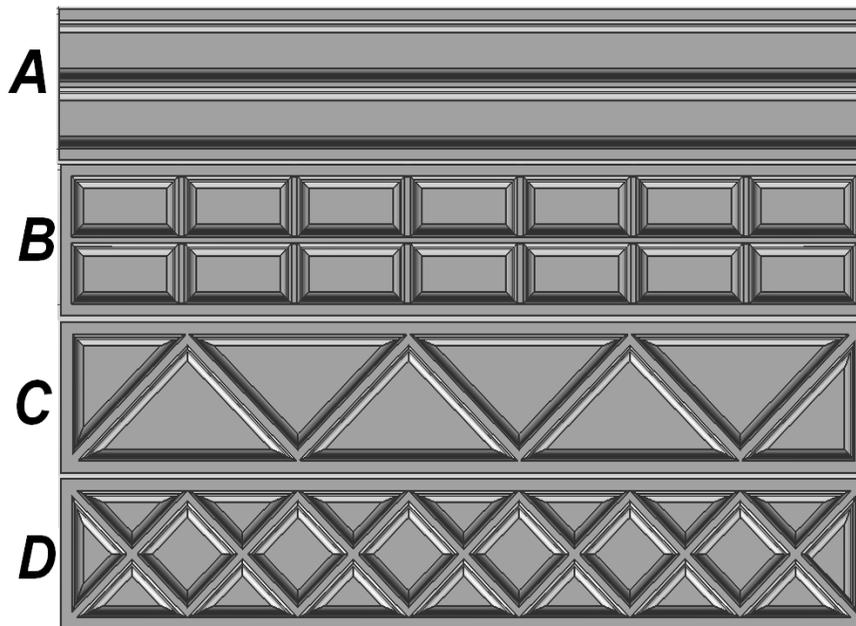


Figura 3.1. Configuraciones [6].

3.3.2. Identificador de perfiles (Código)

Se modelaron 36 piezas, cada una se define como un perfil al que se le asignó un código formado por tres caracteres, con características específicas, es decir, una configuración, un espesor de costilla y un ángulo de salida. El primer carácter del código corresponde a la configuración (conformado por la letra A, B, C ó D), el segundo carácter es el ángulo de salida, para ángulo de 0.5° se le asignó el número 1, para ángulo de 1.5° se le asignó el número 2 y para ángulo de 3° se le asignó el número 3, y el tercer carácter es el espesor de la costilla, para el espesor de $0.4T$ se le asignó el número 1, para $0.5T$ se le asignó el número 2 y para $0.6T$ el número 3 (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Definición de perfil en estudio.

	1 ^{er} dígito				θ		t	
	A	B	C	D	2 ^o dígito	Valor	3 ^{er} dígito	Valor
PERFILES	1	10	19	28	1	0.5°	1	0.4T
	2	11	20	29			2	0.5T
	3	12	21	30			3	0.6T
	4	13	22	31	2	1.5°	1	0.4T
	5	14	23	32			2	0.5T
	6	15	24	33			3	0.6T
	7	16	25	34	3	3°	1	0.4T
	8	17	26	35			2	0.5T
	9	18	27	36			3	0.6T

3.3.3. Material

Los materiales que se utilizaron fueron plástico PBT reforzado con 30% de fibra de vidrio (PBT 2360FL (30% GF)) y PBT natural (PBT 1400A Celanex). Las propiedades de cada material se presentan en la siguiente tabla (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Propiedades de materiales.

PROPIEDAD	MATERIAL 1	MATERIAL 2
	PBT (2360FL-30%GF-)	PBT (1400A CELANEX)
E [MPa]	7600	2900
ν	0.423	0.38
ρ [kg/m ³]	1518.9	1258.6

3.3.4. Análisis

Se realizó un análisis de los 36 perfiles (descritos en la tabla 3.2) en cantilever, en la zona elástica de los materiales propuestos (PBT 1400A Celanex y PBT con 30% GF) y para dicho análisis se tomó en cuenta los siguientes puntos:

- 1) La fuerza puntual de 50 N fue aplicada en el extremo (Fig. 3.2).

- 2) En todos los perfiles, se utilizó un mallado compuesto de elementos tetraedros (10 nodos) y tamaño de malla de 1.5, el cual fue determinado automáticamente en UG NX5 (en la tabla G-3 del glosario se muestra el número de elementos y nodos de cada perfil).
- 3) En el análisis se tomaron tres nodos (a, b y c), con la finalidad de registrar los desplazamientos, el punto que registró los mayores desplazamientos fue el punto “c”, por lo tanto, se considero como el punto de comparación entre los diversos perfiles (Fig. 3.2).

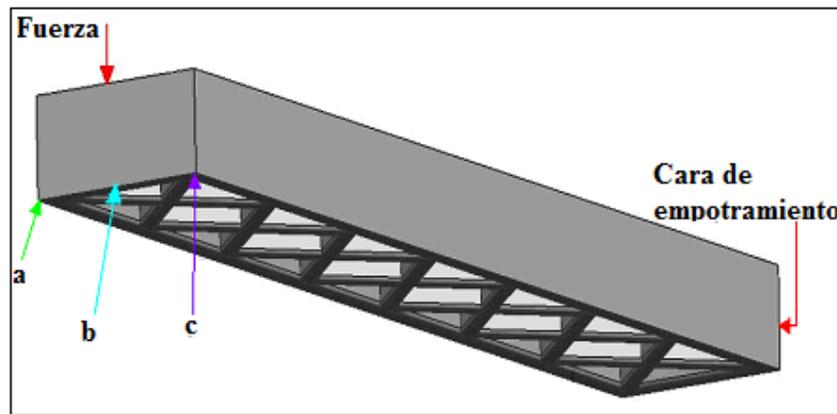


Figura 3.2. Ubicación de empotramiento, fuerza puntual y nodos de estudio.

3.3.5. Análisis de momento de inercia en perfiles de trabajo

Se analizaron 4 perfiles con el mismo ángulo de salida y espesor de costilla de $0.6T$, pero con diferente configuración. Los perfiles que se utilizaron fueron los siguientes: 3, 12, 21 y 30, con códigos A31, B31, C31, D31, respectivamente.

El perfil 3 (Fig. 3.3.A), tiene una sección transversal constante a lo largo del eje longitudinal (Fig. 3.3.B), en la tabla 3.4 se muestra el área y momento de inercia de este perfil:

Tabla 3.4. Resultados de área y momento de inercia del perfil 3.

Área [mm ²]	I [mm ⁴]
126.4045	5456.72

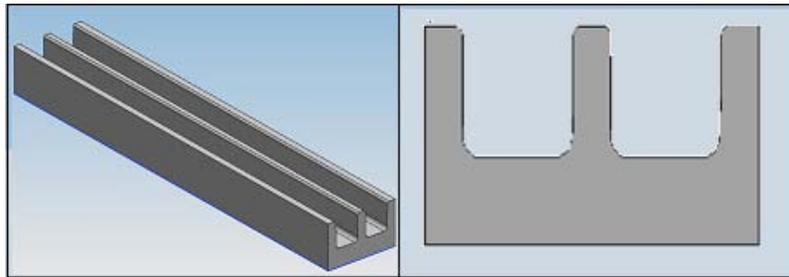


Figura 3.3. A) Perfil 3, con código A31. B) Sección transversal constante del perfil 3.

El perfil 12, con una configuración “B” (Fig. 3.4.A), no presenta sección transversal constante. La sección A y B de la (Fig. 3.4.B), indican el área y momento de inercia en dicha sección transversal, los resultados se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados de área y momento de inercia en el perfil 12.

SECCIÓN A		SECCIÓN B	
Área [mm ²]	I [mm ⁴]	Área [mm ²]	I [mm ⁴]
132.07	5910.7	208.65	7522.80

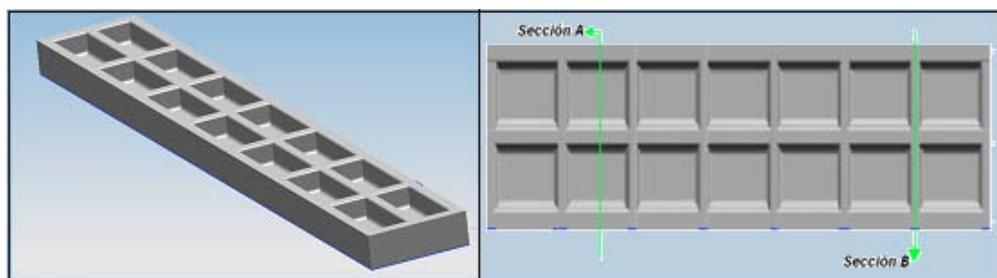


Figura 3.4. A) Perfil 12, con código B31. B) Sección A y B transversales del perfil 12.

El perfil 21, con una configuración “V” (Fig. 3.5.A), no presenta sección transversal constante. Se tomarán cinco secciones: A, B, C, D y E, las cuales, indican el área y momento de inercia en dicha sección transversal (Fig. 3.5.B), los resultados se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados de área y momento de inercia del perfil 21.

Sección	Área [mm ²]	I [mm ⁴]
Sección A	208.6	7522.8
Sección B	130	5472.73
Sección C	130	5472.73
Sección D	130	5472.73
Sección E	122	5400

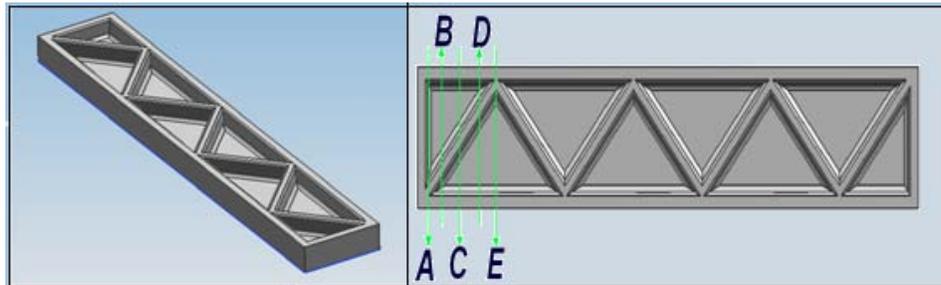


Figura 3.5. A) Perfil 21, con código C31. B) Secciones A, B, C, D y E transversales del perfil 21.

El perfil 30, con una configuración “X” (Fig. 3.6.A), no presenta sección transversal constante. Se tomarán cinco secciones: A, B, C y D, las cuales, indican el área y momento de inercia en dicha sección transversal (Fig. 3.6.B), los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados de área y momento de inercia del perfil 30.

Sección	Área [mm ²]	I [mm ⁴]
Sección A	152	6285.02
Sección B	152	6285.02
Sección C	152	6285.02
Sección D	133.41	5472.73

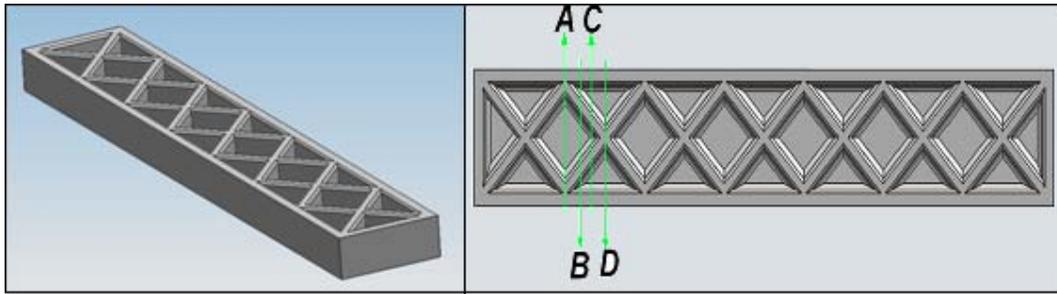


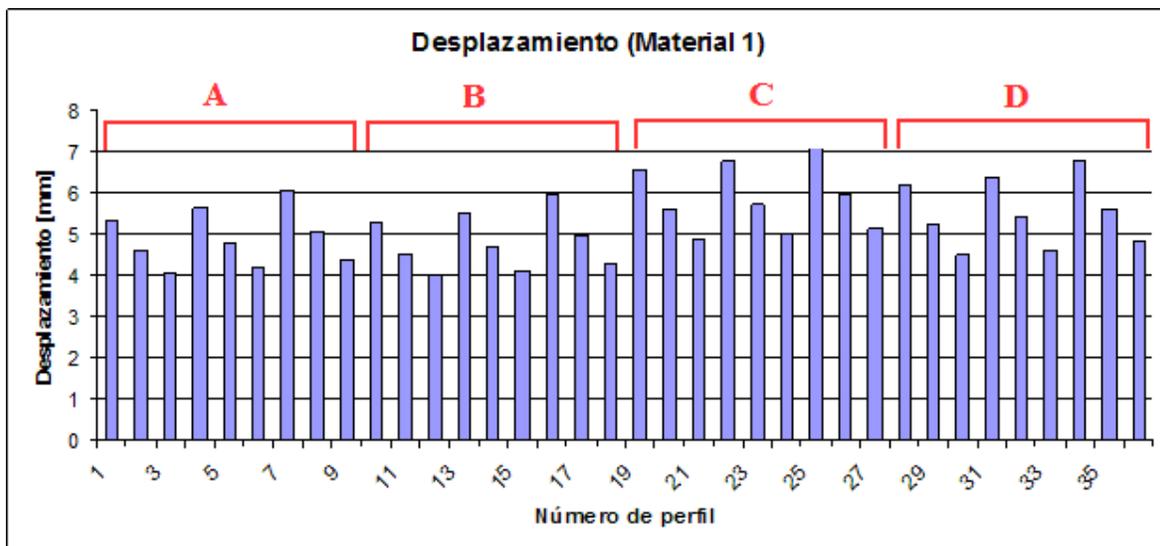
Figura 3.6. A) Perfil 30, con código D31. B) Secciones A, B, C y D transversales del perfil 30.

3.4. RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO

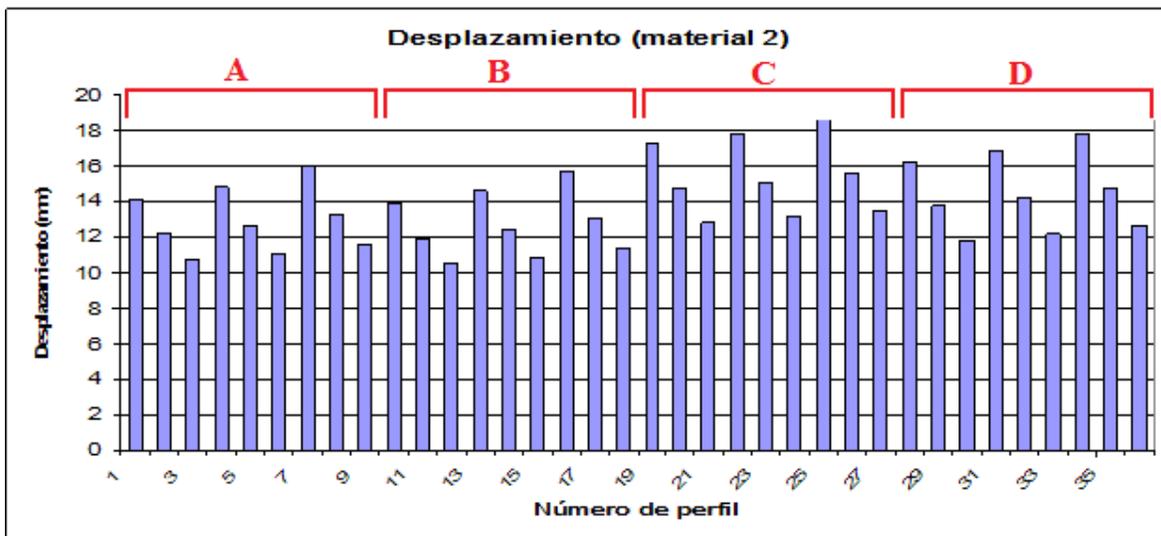
Las piezas con costillas de 0.6T de espesor, sufren menor desplazamiento. Los perfiles con dichas características son los siguientes: 12, 3, 15, 6, 18 y 9 (Gráfica 3.2 y 3.3).

Las piezas que presentaron mayor desplazamiento, fueron las piezas con costillas de espesor de 0.4T y ángulos de salida de 3°; los perfiles con dichas características son los siguientes: 25, 34, 22, 19 y 31 (Gráfica 3.2 y 3.3).

En la tabla G-1 y G-2 del glosario se muestran los 36 perfiles con la información de parámetros y desplazamiento que sufre cada perfil, tanto para el material 1 como para el material 2.



Gráfica 3.2. Comportamiento de los perfiles con PBT (2360FL-30%GF-).



Gráfica 3.3.- Comportamiento de los perfiles con PBT (1400^a Celanex).

En la figura 3.8 se muestra el desplazamiento de uno de los perfiles de trabajo. En la zona de color azul, se ubica el empotramiento y la zona de color rojo es la que sufre mayor desplazamiento (zona de aplicación de la fuerza).

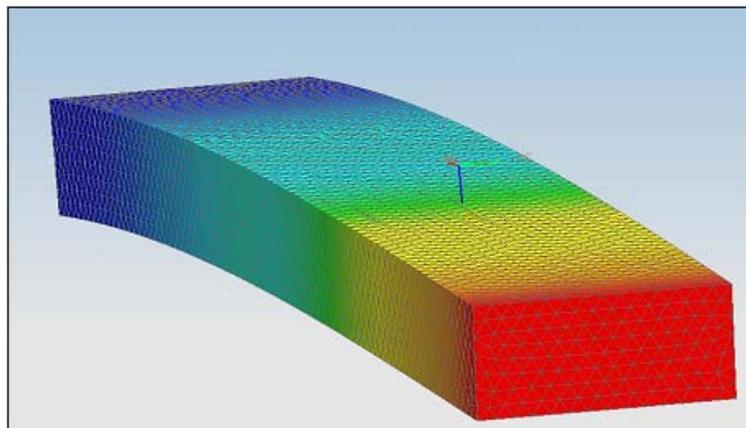


Figura 3.8. Desplazamiento en perfil de trabajo.

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO

Para determinar las recomendaciones de los parámetros de costillas, se hará un análisis de resultados, obtenidos de la simulación de análisis de elemento finito de la viga en cantilever, con los 36 perfiles.

3.5.1. Análisis de resultados de Elemento Finito

Los perfiles con mayor rigidez son los que cuentan con los siguientes parámetros de costillas:

Espesor de costilla: El espesor de la costilla es definitivamente el parámetro al que se le debe tomar mayor atención, los manuales de diseño mostraron en su mayoría espesores de 40 a 60% el espesor de la pared a reforzar, sin embargo, se encontró en el trabajo que definitivamente un espesor de 40% no sirve en una aplicación para estructura. En diseño de estructura es recomendable espesores de 60% ya que se registro un menor desplazamiento, incluso independientemente de la configuración que se le asigne a la pieza.

Ángulos de salida: El caso de las piezas con ángulo de salida grandes (de 3°) no son recomendables, ya que se adelgaza el espesor de la costilla, pierde rigidez y disminuye el momento de inercia. Se recomiendan ángulos de salida pequeños, sin embargo, desde el punto de vista de manufactura de los moldes de inyección, esto es difícil, ya que es necesario que la pieza cuente con el mayor ángulo de salida posible.

El espesor de costilla y ángulo de salida, están ligados al análisis de momento de inercia de la sección transversal del perfil en estudio, es decir, entre mayor sea el área transversal de la viga, mayor es el momento de inercia y por ende, la deflexión es menor, como lo podemos ver en la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

El módulo de elasticidad de los materiales en estudio, es proporcional a la deformación que sufren los perfiles en los dos casos de material, es decir, el módulo elástico del material 1 es 2.6 veces mayor al de el material 2, por lo tanto un perfil con material 2, se deformará 2.6 veces más, que el mismo perfil, pero con el material 1.

El porcentaje en que aumenta la rigidez en todos los perfiles, con respecto al espesor de la costilla, es el mismo para los dos materiales estudiados, independientemente de la configuración. Los perfiles con costillas de mayor espesor tienen mayor rigidez, por lo tanto, las costillas que tienen espesor de 0.5 T respecto a las que tienen 0.4 T, aumenta la rigidez entre 13.6 y 17 % y las que tienen 0.6 T respecto a las de 0.4 T, aumenta el doble la rigidez.

Para lograr una mayor integridad estructural, las configuraciones más eficientes son la “B” y “A”, respecto a los materiales utilizados, que presentaron el mismo patrón de deformación en todos los perfiles de estudio.

Incluso con los parámetros recomendados, las configuraciones menos rígidas, para el caso de flexión son la “C” y “D”, ya que su rigidez es menor en un 22 y 12% respectivamente, del perfil con mayor rigidez.

3.6. ANÁLISIS DE INYECCIÓN

En la simulación de inyección se consideraron los siguientes puntos:

- En los 36 perfiles, el punto de inyección se colocó en uno de los extremos sobre el centro de la cara transversal como se indica en la figura 3.7.

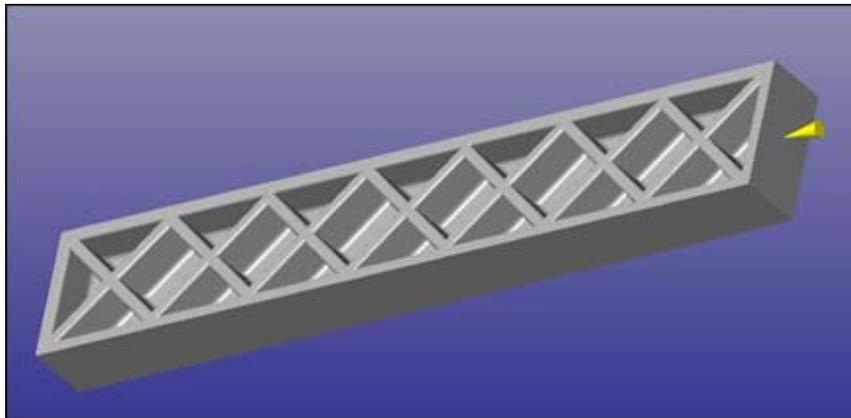
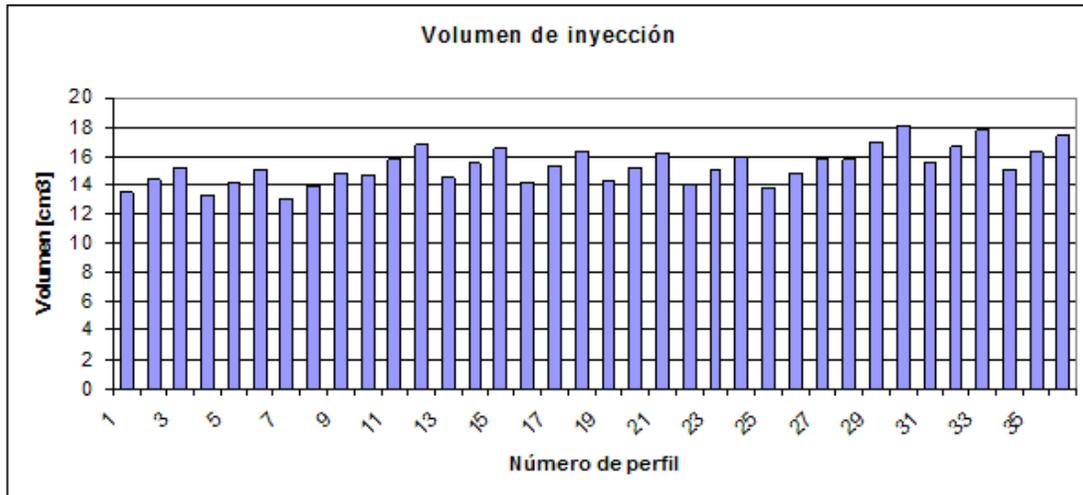


Figura 3.7. Ubicación del punto de inyección.

- Se inyectó los materiales propuestos: PBT 1400A Celanex y PBT 2360FL (30% GF).
- El volumen de material de inyección en los 36 perfiles se muestran en la gráfica 3.1.



Gráfica 3.1. Volumen de inyección en los 36 perfiles.

3.7. RESULTADOS DE INYECCIÓN

A continuación se presenta los resultados de simulaciones de inyección, la presión de inyección de cada uno de los perfiles, tanto para el material 1 como para el material 2, así como el tiempo de inyección, el tiempo total del ciclo y moldeabilidad del perfil.

3.7.1. Presión de inyección

La configuración de costillas en B y D requiere más presión de inyección, frente a la configuración A, por lo tanto esta última tiene mayor estabilidad de presión. En la figura 3.9 se presenta la distribución de presión de la configuración D.

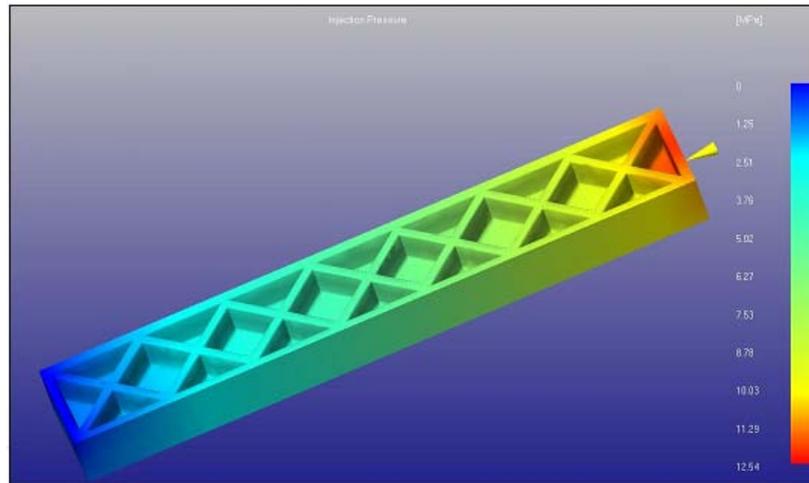
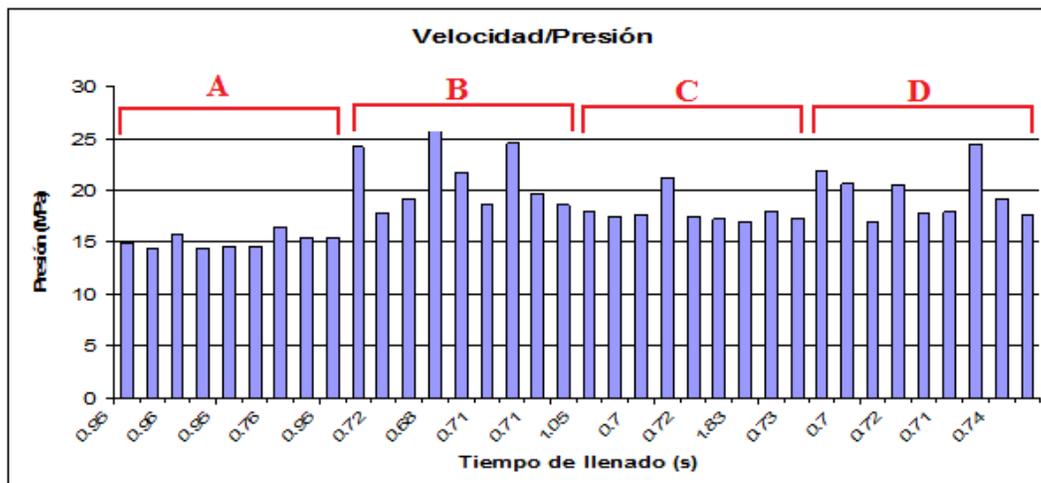


Figura 3.9. Distribución de presión.

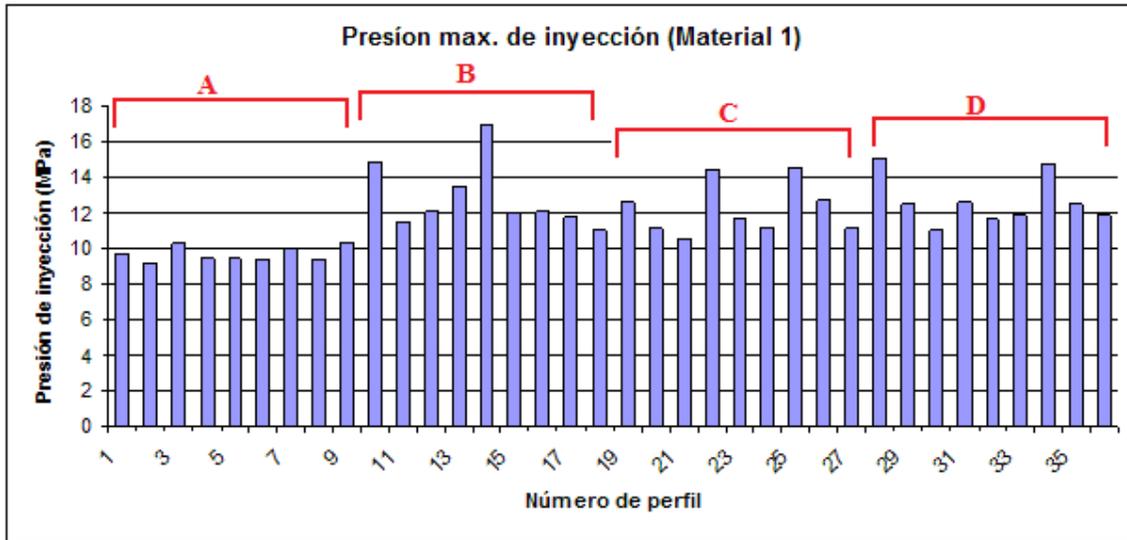
La estabilidad en la presión permite conocer los niveles de esfuerzos residuales en la pieza. Además, el principio de gradiente de presión constante dice que el patrón de llenado más eficiente es cuando el gradiente es constante a lo largo de la trayectoria del flujo [19]. Un pico de presión normalmente es un signo de desequilibrio. Por lo tanto, se puede observar que el gradiente de presión (presión por unidad de longitud) es constante a lo largo de la configuración A (Gráfica 3.4).



Gráfica 3.4. Velocidad / Presión de llenado en perfiles de trabajo.

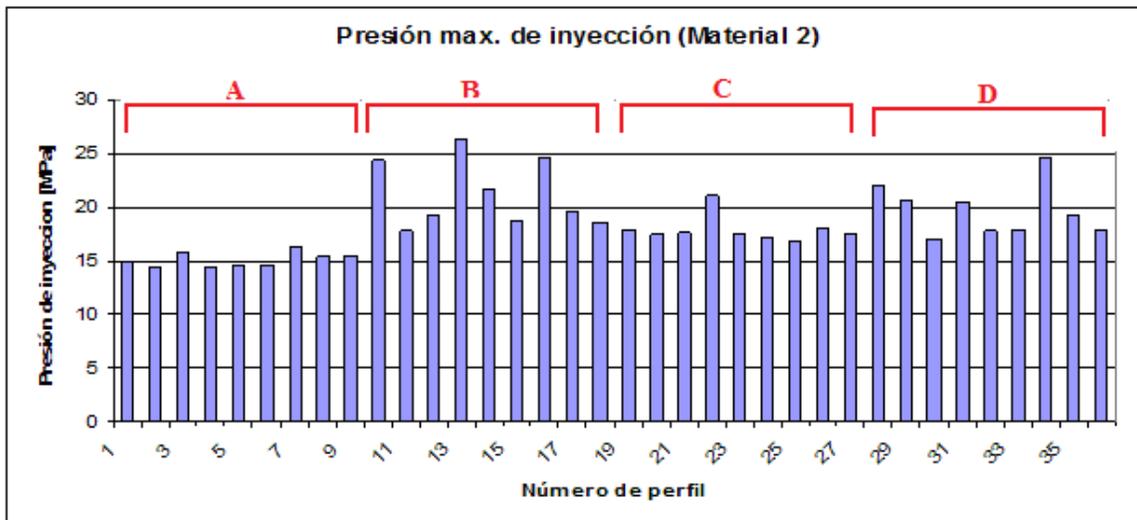
Los perfiles que presentaron mayor presión de inyección, fueron los que tenían espesores de costillas de 0.4 T y configuración B, C y D. El ángulo de salida fue indistinto, el material 2 presento mayor presión de inyección que el material 1. Así mismo los perfiles que presentaron menor

presión de inyección, son los que cuentan con configuración A, tanto para el material 1 como el material 2, los cinco perfiles con menor tasa de presión de inyección fueron: 2, 4, 5, 6 y 8. Para el material 1, los perfiles inyectados que requieren mayor presión de inyección son las siguientes: 14,10, 22, 28 y 25 (Gráfica 3.5).



Gráfica 3.5. Presión de inyección (material 1).

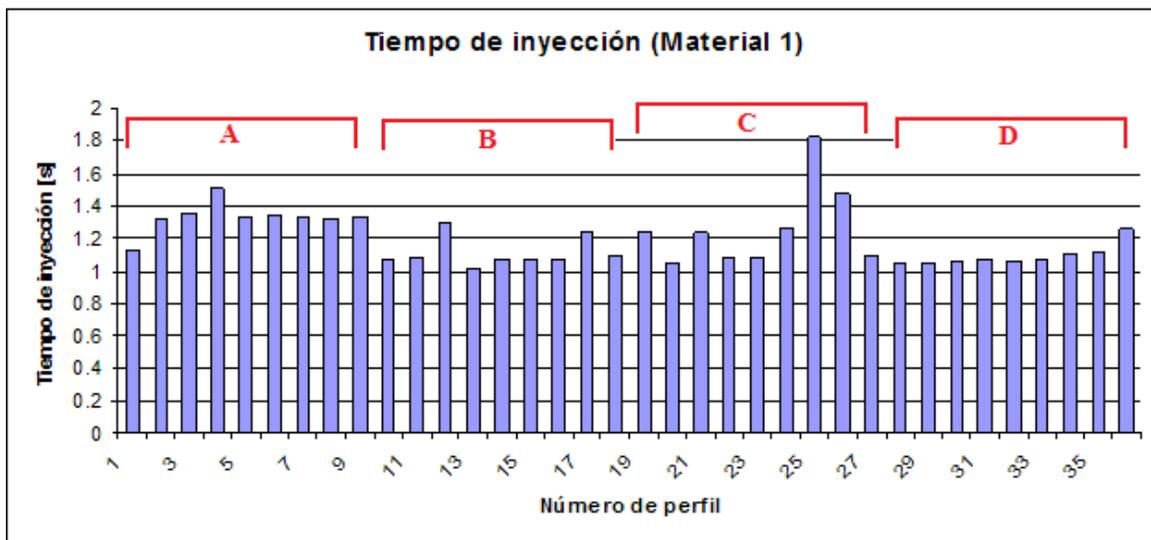
Para el material 2, los perfiles inyectados que requirieron mayor presión de inyección fueron: 13, 10, 16 y 34 (Gráfica 3.6).



Gráfica 3.6. Presión de inyección (material 2).

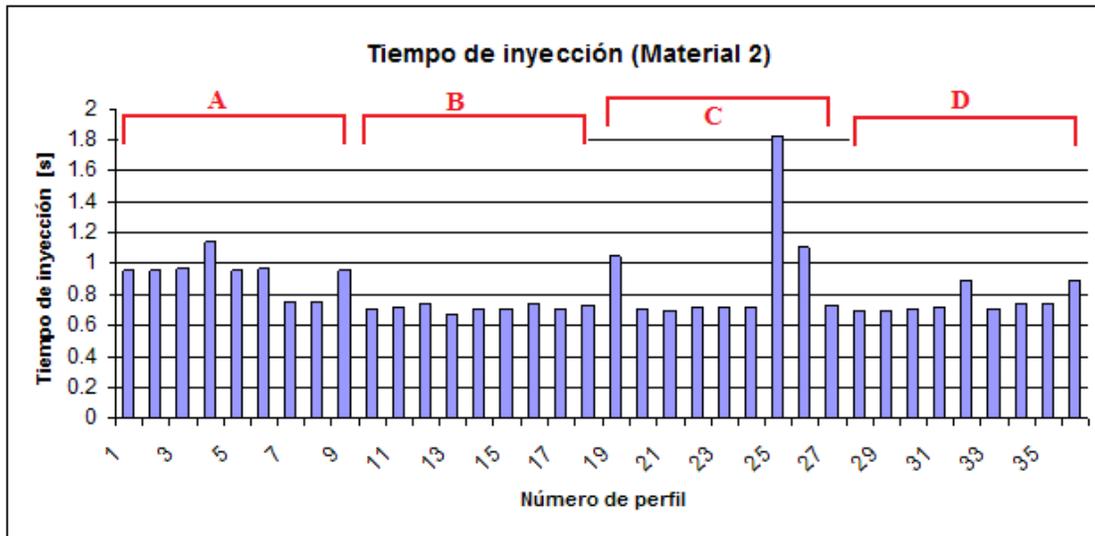
3.7.2. Tiempo de inyección

Para el caso del material 1, el mayor tiempo de inyección, se presentó en perfiles con configuración C y A, con espesores de 0.4 T y 0.5 T. Los perfiles que requirieron más tiempo de inyección son las siguientes: 4, 25 y 26. Los perfiles que más rápido se llenaron fueron las siguientes: 13 (con 1.02 s de configuración B), 20 (con 1.05 s de configuración C), 29 y 28 (con 1.05 s de configuración D) y 30 y 32 (con 1.06 s de configuración D) (Gráfica 3.7).



Gráfica 3.7. Tiempo de inyección (material 1).

En el caso del material 2, se presentó el mismo patrón en tiempo de inyección que en el material 1, respecto a los perfiles con configuración C y A, con espesores de 0.4T para los tres perfiles que tardaron más en inyectar. Con el material 2, los perfiles que requirieron mayor tiempo de inyección, fueron las siguientes: 4, 19, 25 y 26; así mismo, los que más rápido se llenaron con configuración B, fueron los siguientes: 13 con 0.68 s y 14 con 0.71 s (Gráfica 3.8).



Gráfica 3.8. Tiempo de inyección (material 2).

En la figura 3.10 se muestra la distribución del tiempo de inyección en segundos de un perfil de trabajo.

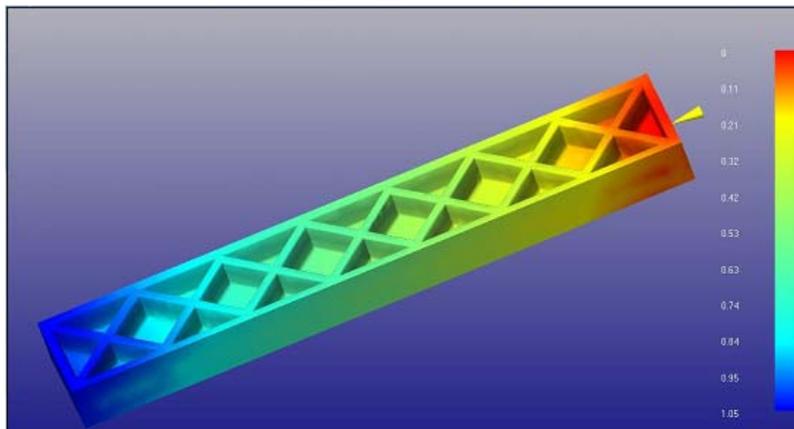
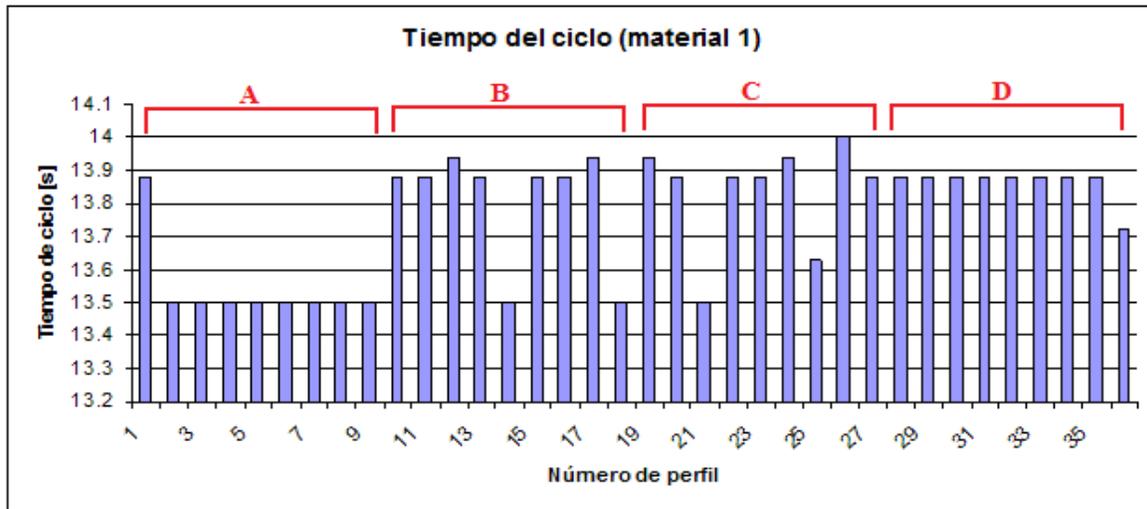


Figura 3.10. Tiempo de llenado.

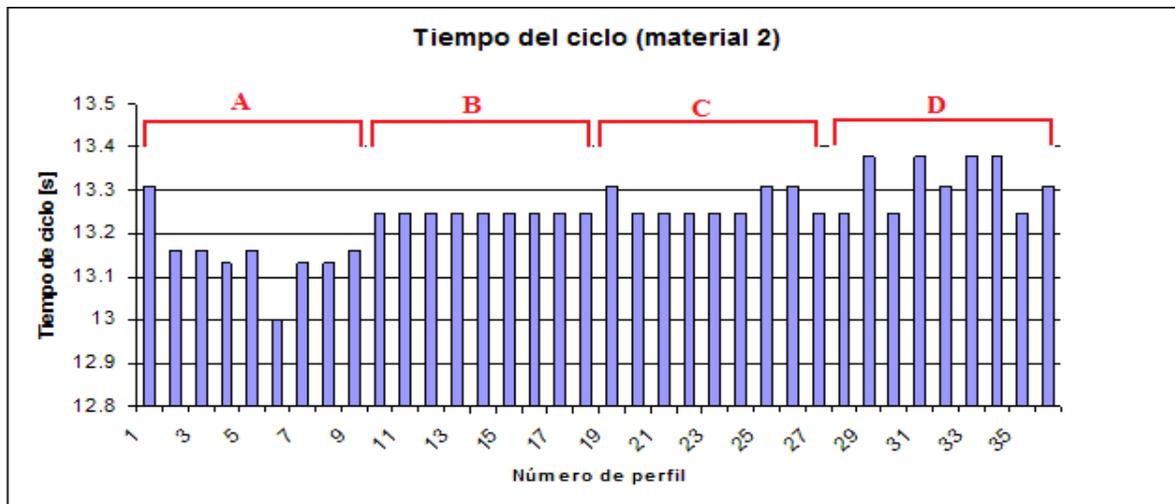
3.7.3. Tiempo total del ciclo

Tanto en el material 1 como en el material 2, el tiempo de ciclo se encuentra en un rango de 13.2 a 14 s. Para el caso del material 1, se presentó un tiempo de ciclo mayor en los siguientes perfiles: 26 (con 14 s de configuración C), así como 12 y 17 (con 13.94 s de configuración B). Los menores tiempos de ciclo se registraron de 13.5 s, con configuración A en los perfiles siguientes: del 2 al 9 (Gráfica 3.9).



Gráfica 3.9. Tiempo de ciclo (material 1).

Para el caso del material 2, se presentó un tiempo de ciclo mayor en los siguientes perfiles: 29, 30, 31, 33 y 34 (con 13.38 s de configuración D), así como 12 y 17 (con 13.94 s de configuración B). Los menores tiempos de ciclo registrados fueron los perfiles con configuración A, anunciados a continuación: del 2 al 9 que se encuentran dentro del rango 13 a 13.2 s (Gráfica 3.10).



Gráfica 3.10. Tiempo de ciclo (material 2).

3.7.4. Moldeabilidad

Es necesario tomar en cuenta los resultados que nos arroja la simulación de inyección para saber que tan difícil será la inyección del perfil en estudio. En este caso se consideran cuatro categorías de menor a mayor grado de dificultad de inyección y si es o no, aceptable la calidad del perfil inyectado.

Para el caso del material 1, a continuación, se darán los perfiles según la categoría al que esta asociado.

- Puede ser difícil de llenar, pero la calidad será probablemente aceptable: 1, 2, 8 y 24.
- Llenado fácil y calidad probablemente inaceptable: 3, 5, 6 y 9.
- Puede ser difícil de llenar y la calidad de pieza inaceptable: 4, 7, 10, 11, 12, 16, 18, 20, 21, 23, 27, 28, 29, 30, 32, 33 y 36
- Muy difícil llenar y la calidad de pieza inaceptable: 13, 14, 15, 17, 19, 22, 25, 26, 31, 34 y 35

Para el caso del material 2, se darán los perfiles según la categoría al que esta asociado.

- 1) Puede ser difícil de llenar, pero la calidad será probablemente aceptable: 20, 24, 29, 31 y 32.
- 2) Llenado fácil y calidad probablemente inaceptable: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 18, 23, 30 y 36.
- 3) Puede ser difícil de llenar y la calidad de pieza inaceptable: 11, 13, 15, 16, 17, 21, 22, 27, 28 y 33.
- 4) Muy difícil llenar y la calidad de pieza inaceptable: 14, 19, 25, 26, 34 y 35.

3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INYECCIÓN

En la simulación de inyección se hace referencia al análisis de resultados en: presión de inyección, tiempo de inyección, tiempo total del ciclo y moldeabilidad del perfil.

- *Presión de inyección*

El gradiente de presión es constante en la configuración “A”, esto se debe a que la sección transversal de dicha configuración es constante a lo largo del eje longitudinal, por lo tanto, es menor la presión de inyección que se requiere. La razón por lo que se requiere mayor presión de inyección,

es porque el área proyectada es mayor, en consecuencia la fuerza de cierre también será mayor, es decir, para las configuraciones B, C y D, se requiere mayor presión de inyección y están más propensas a concentraciones de esfuerzos residuales, la mayoría tiene dificultad para llenar, con la incertidumbre de que el perfil no cumpla con los requerimientos necesarios.

La presión alta que se requiere para inyectar, se debe a la viscosidad del material, en el caso del material dos, en comparación con el material 1.

- *Tiempo de inyección*

Independientemente del material la configuración más estable en cuanto a tiempo de inyección es la configuración “D”, sin embargo se llenan más rápido los perfiles de la configuración “B”. La configuración “A” tarda más tiempo en llenar y la configuración menos estable es la “C”, sobretodo con ángulo de salida mayores a 0.5° y espesores de costilla menores de 0.6 T.

- *Tiempo de ciclo*

El tiempo de ciclo para todos los casos de estudio es estable, varía entre 13 y 13.38 s en el caso del material 1 y en el caso del material 2, entre 13.5 y 14 s. Los menores tiempos de ciclo se registran en la configuración “A” y se comporta de una manera estable, con diferencias de rangos de 0.4 s para los dos materiales utilizados. Para el caso del material 1, la configuración “D” registra los mayores tiempos de ciclo, sin embargo, su rango es estable, a diferencia del material 2. Los tiempos de ciclo de la configuración B y C en el material 2, se comportaron de una manera estable, mismo que en el material 1, no existe esa estabilidad.

- *Moldeabilidad*

En la moldeabilidad de las piezas, tenemos cuatro categorías que indican el nivel de dificultad para la inyección de la pieza, así como la calidad del producto terminado. Las categorías son las siguientes:

1. Puede ser difícil de llenar pero la calidad será probablemente aceptable: Sólo un perfil coincidió en los dos materiales, el 24. Las piezas que están dentro de esta categoría son piezas que tienen configuraciones A, C y D con ángulos menores de 3° .

2. Llenado fácil y calidad probablemente inaceptable: En este caso se registra un configuración “A”, no se tiene un espesor y ángulo de salida específico, que nos de más indicios del comportamiento de los parámetros, para mejorar la moldeabilidad del perfil.
3. Puede ser difícil llenado y calidad de pieza inaceptable: Se presentaron perfiles de configuración B, C y D.
4. Muy difícil de llenar y calidad de pieza inaceptable: Se presentaron perfiles con configuración “C” principalmente. Perfiles de configuración “A” no se hacen presentes con esta condición.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

4.1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz se encarga del diseño, desarrollo y fabricación, además de la comercialización y venta de automóviles, comprometiéndose a ofrecer productos de alta calidad y bajo costo.

A partir de los resultados del capítulo anterior, es posible proponer una nueva geometría para mejorar el comportamiento (rigidez) en piezas de plástico. Para validar la propuesta de diseño, en el presente capítulo se realizará un análisis de elemento finito (FEM) a un pedal de acelerador (Fig. 4.1), utilizando la geometría más rígida, propuesta del capítulo anterior.

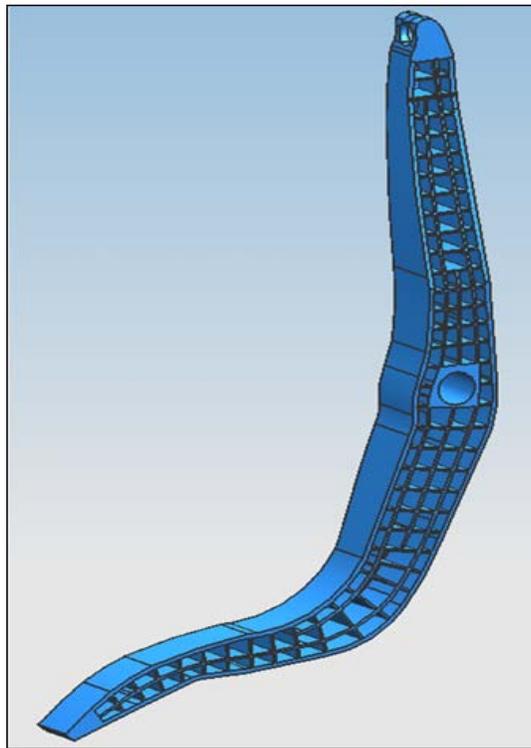


Figura 4.1. Modelo CAD de pedal de acelerador con costillas de configuración B.

4.2. CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES

- a) El material se considera sólido y continuo

El comportamiento real de los materiales cumple con esta hipótesis aún cuando pueda detectarse la presencia de poros o se considere la discontinuidad de la estructura de la materia, compuesta por átomos que no están en contacto rígido entre sí, ya que existen espacios entre ellos y fuerzas que los mantienen vinculados, formando una red ordenada.

- b) Selección del material

Para este caso de estudio, se busca trabajar con un material plástico con un rango amplio de Módulo de Elasticidad, para observar la influencia del material en la geometría y rigidez.

- c) Material Isotrópico

El material mantiene idénticas propiedades mecánicas en todas las direcciones.

- d) Principio de Saint Venant

Este principio establece que el valor de las fuerzas interiores en los puntos de un sólido, situados suficientemente lejos de los lugares de la aplicación de las cargas, depende muy poco del modo concreto de aplicación de las mismas. Con la ayuda de este principio, en muchos casos se puede sustituir un sistema de fuerzas por otro estáticamente equivalente, lo que puede conducir a la simplicidad del cálculo [21].

4.3. METODOLOGÍA

Parámetros y características del caso de estudio

El modelo geométrico fue realizado Unigraphics versión NX5 (Fig. 4.1). El caso de estudio, como ya se mencionó, consiste en el análisis del comportamiento de deformación de un pedal de acelerador. Con base al capítulo 3 sección 3.5, el perfil que tiene el mejor comportamiento desde el punto de vista de rigidez es la configuración B y espesores de pared constantes, por tal razón se utilizó en este caso de estudio. En la siguiente tabla se muestran los parámetros utilizados durante el análisis y simulación de elemento finito (Tabla 4.1):

Tabla 4.1. Parámetros del caso de estudio.

Parámetro	Experimento para el caso de estudio
T [mm]	2
t [mm]	1.2
F [N]	500
Tamaño de malla	2.8
Elemento	Tetraédro de 10 nodos

Los materiales que se utilizaron fueron los siguientes (Tabla. 4.2):

Tabla 4.2. Propiedades de materiales.

Propiedad	Material1	Material 2
	PBT (2360FL-30%GF-)	PBT (1400A Celanex)
E [MPa]	7600	2900
ν	0.423	0.38
ρ [kg/m³]	1518.9	1258.6
Sy [MPa]	120	60

Es conveniente mencionar que aunque el análisis se realizó dentro del rango elástico de los materiales propuestos, se consideran como materiales isotrópicos, sin embargo, el material PBT (2360FL-30%GF-) es un material compuesto con fibras de vidrio, es decir, es un material ortotrópico, donde las tensiones aplicadas y deformaciones unitarias no son las mismas para diferentes direcciones.

En la tabla G-4 y G-5 del glosario, se encuentran las propiedades físicas de los materiales PBT 1400A Celanex y PBT 2360FL 30% GF, respectivamente.

4.4. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN

- Se realizó el análisis de cuerpo libre del pedal utilizando el modelo CAD, para establecer que la distancia de la zona de restricción a los extremos finales del pedal (E1 y E2) es la misma (Fig. 4.2), por lo tanto, las fuerzas a los que está sujeto el pedal, también son las mismas.
- Se restringió el modelo en la parte del soporte del centro (zona de restricción), sin permitir la rotación y translación (Fig. 4.2).
- Se aplicó una fuerza normal de 500 N en los extremos del pedal (donde se aplica la fuerza al pedal (Fig. 4.3) y donde se fija el chicote de acelerador (Fig. 4.4)).

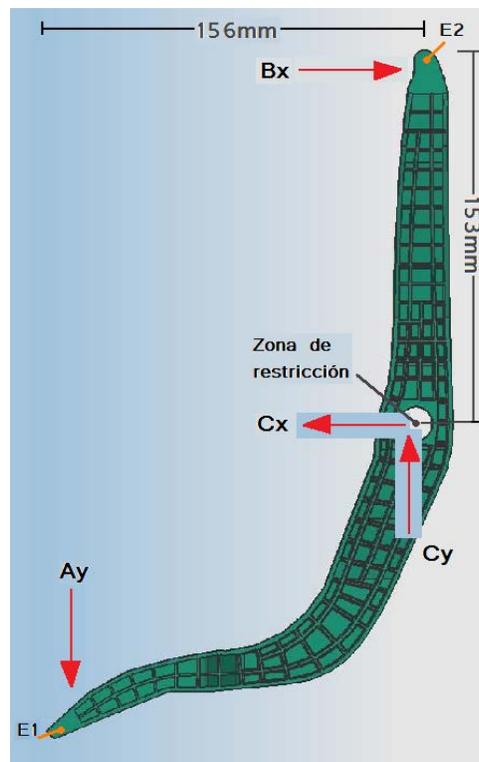


Figura 4.2. Diagrama de cuerpo libre, ubicación de los extremos (E1 y E2), ubicación de las fuerzas A_y y B_x y ubicación de la zona de restricción.

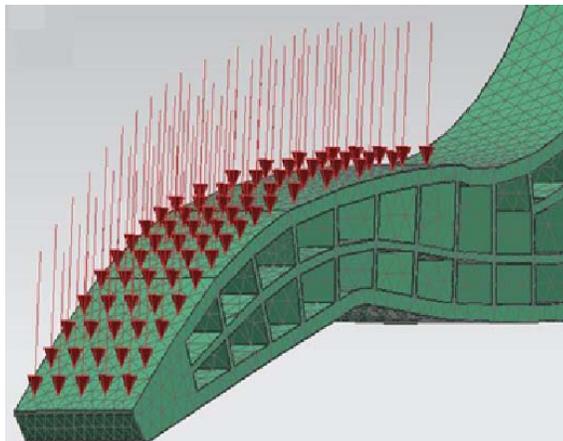


Figura 4.3. Aplicación de la fuerza.

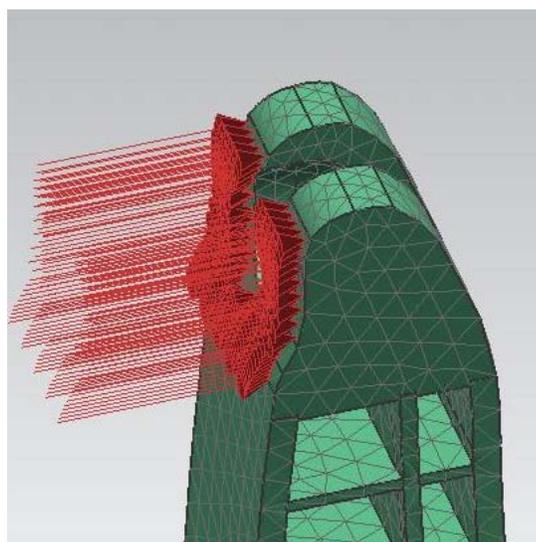


Figura 4.4. Aplicación de la fuerza al chicote de acelerador.

d) Las propiedades físicas del pedal de acelerador se muestran en la tabla siguiente (Tabla 4.4):

Tabla 4.4. Propiedades físicas del pedal de acelerador.

Propiedad	Valor
Volumen	77532 mm ³
Peso	5.9538 N
Masa	0.607126 kg
Área	92783mm ²

- e) Para el caso de los desplazamientos, se analizaron 6 puntos, tanto en la parte inferior del pedal: *a*, *b* y *c*; como en la parte superior del pedal: *d*, *e* y *f*, como se indica en la figura 4.6.1 y 4.6.2 en el caso del material PBT 2360 (30% FG) y en la figura 4.7.1 y 4.7.2 para el material PBT Celanex 1400A.

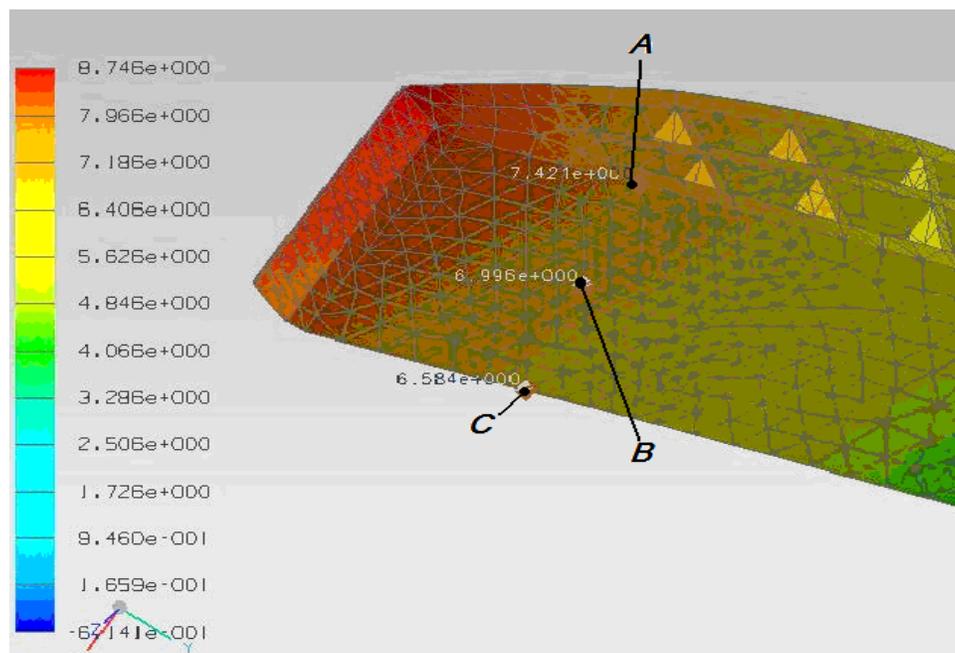


Figura 4.6.1. Ubicación de puntos de análisis para los desplazamientos en la parte inferior.

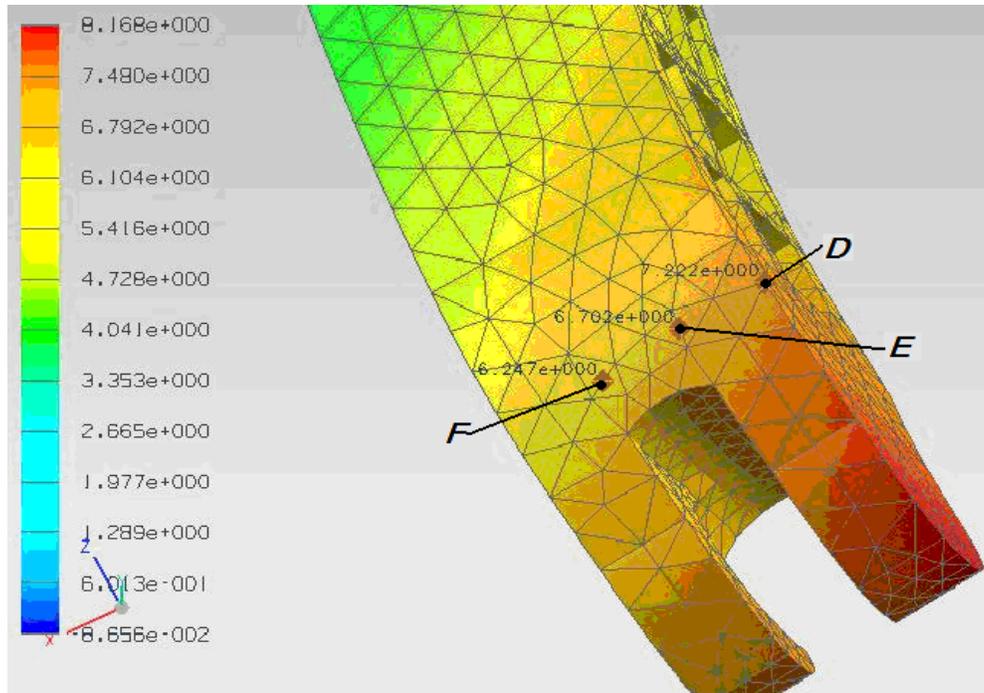


Figura 4.6.2. Ubicación de puntos de análisis para los desplazamientos en la parte superior.

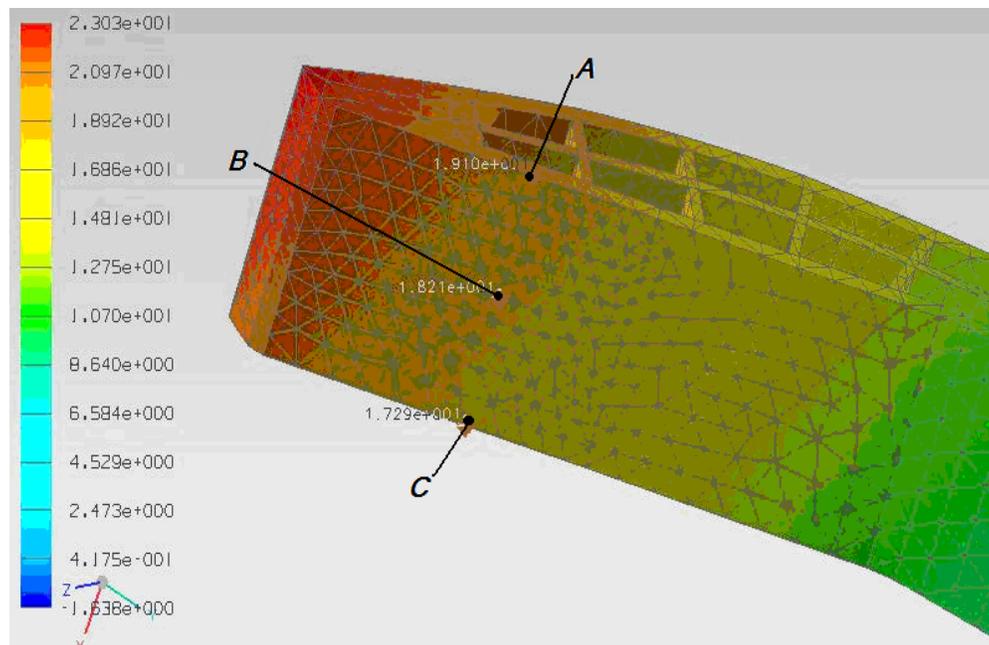


Figura 4.7.1. Ubicación de puntos de análisis para los desplazamientos en la parte inferior.

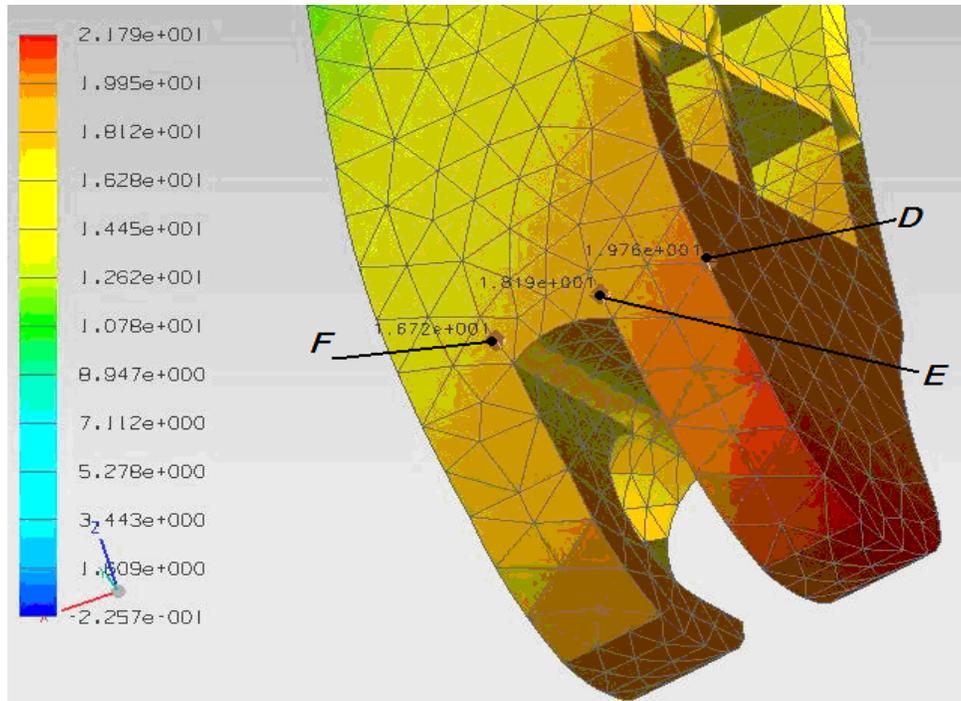


Figura 4.7.2. Ubicación de puntos de análisis para los desplazamientos en la parte superior.

- f) Para realizar una mejor comparación de los resultados, se decidió tomar seis puntos de análisis para los esfuerzos (Fig. 4.5), tres en la parte inferior: a, b y c y tres en la superior: d, e y f.

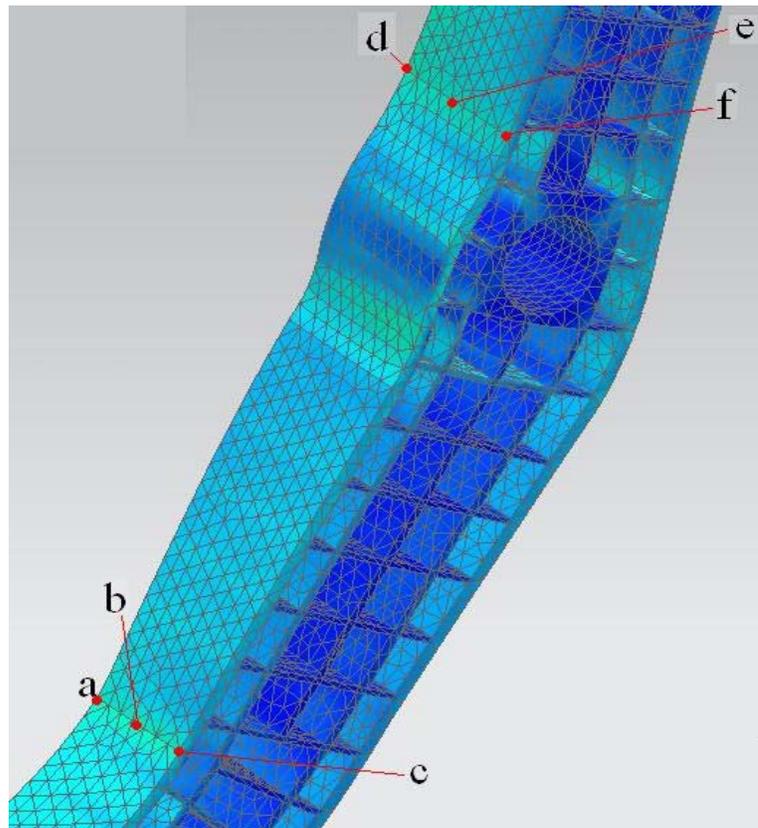


Figura 4.5. Ubicación de los puntos de análisis de esfuerzos.

4.5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Los resultados de esfuerzo y desplazamiento obtenidos, tanto para el material PBT reforzado 30% GF (Tabla 4.5) como para el material PBT Celanex 1400A (Tabla 4.6), son los siguientes:

- Material 1: PBT (2360FL-30%GF-).

Tabla 4.5. Resultados de esfuerzo y deformación para el material PBT (2360FL-30%GF-).

Resultados de esfuerzo y desplazamiento en el material PBT 2360 (30% FG)		
Punto de análisis	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)
a	61.403	7.421
b	66.379	6.996
c	59.850	6.584
d	58.486	7.22
e	62.717	6.702
f	49.917	6.247

- Material 2: PBT Celanex 1400A.

Tabla 4.6. Resultados de esfuerzo y deformación para el material PBT Celanex 1400.

Resultados de esfuerzo y desplazamiento en el material PBT Celanex 1400A		
Punto de análisis	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)
a	66.58	19.1
b	59.70	18.2
c	62.31	17.29
d	51.79	19.76
e	58.94	18.19
f	63.36	16.72

4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.6.1. Análisis de resultados de desplazamientos

Tanto para el material reforzado como para el material al natural, se presentan grandes desplazamientos en los puntos de análisis. El caso del material 1 (PBT 2360FL-30%GF-), en promedio se tiene 7.8 mm en la zonas donde existe mayor desplazamiento, razón por la cual, puede afectar el desempeño de la pieza y reducir la vida del pedal fallando de manera prematura. En el caso del material 2 (PBT Celanex 1400A), presenta 18.2 mm de desplazamiento, considerándolo no rígido.

4.6.2. Análisis de resultados de esfuerzos

De acuerdo a los resultados obtenidos, se analizó sí el material en conjunto con la geometría es eficiente, de acuerdo, a los resultados de esfuerzos que presenta el pedal, estos resultados se comparan con el esfuerzo de cedencia, tomando a este como el valor teórico.

Se utilizó el criterio elástico de coeficiente de seguridad basado en la relación de tensiones, controlando el valor de la tensión máxima que se produce en cierto punto de la estructura [21].

$$\sigma \leq \frac{S}{n}$$

Donde:

S: Valor límite de la tensión para el material dado (Esfuerzo de cedencia).

n: Coeficiente de seguridad.

σ : Esfuerzo (Fuerza aplicada).

1. El material PBT 2360 (30% FG), que tiene un esfuerzo de cedencia de 120 MPa [20], presenta los siguientes resultados (Tabla 4.7):

Tabla 4.7. Análisis de resultados para el material PBT 2360 (30% FG).

Punto de análisis	Esfuerzo (MPa)	% Error
a	61.4	48.83
b	66.4	44.68
c	59.9	50.12
d	58.5	51.26
e	62.7	47.73
f	49.9	58.40

Para este caso, se considera que el comportamiento tanto del material como la geometría propuesta es eficiente, ya que el esfuerzo de proporcionalidad que presenta la pieza resulta ser de aproximadamente el 50% del esfuerzo de cedencia, es decir, la tensión de trabajo resulta menor a la admisible.

Tomando en cuenta el valor de esfuerzo que presenta la pieza (Tabla 4.6), se calculó el coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{120[\text{MPa}]}{66.4[\text{MPa}]} = 1.807$$

Se considera que el pedal no falla estáticamente ya que, el factor de seguridad es mayor a 1.

2. El material PBT Celanex 1400A que tiene un esfuerzo de cedencia de 60 MPa [20], presenta los siguientes resultados (Tabla 4.8):

Tabla 4.8. Análisis de resultados para el material PBT 2360 (30% FG).

Punto de análisis	Esfuerzo (MPa)	% Error
a	66.6	10.97
b	59.7	0.5
c	62.3	3.85
d	51.8	13.68
e	58.9	1.75
f	63.4	5.6

Para este caso se considera que el comportamiento tanto del material como la geometría propuesta no es eficiente, ya que el esfuerzo de proporcionalidad que presenta la pieza resulta ser de aproximadamente entre 10 y 13.6% del esfuerzo de cedencia, es decir, la tensión de trabajo resulta mayor a la admisible.

Tomando en cuenta el valor de esfuerzo que presenta la pieza (Tabla 4.7), se calculó el coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{60[\text{MPa}]}{66.6[\text{MPa}]} = 0.90$$

Se considera que el pedal falla estáticamente y por lo tanto, el factor de seguridad es menor a 1.

CONCLUSIONES

Se validaron las recomendaciones de costillas propuestas por las diferentes empresas fabricantes de plásticos y se encontró que no todos los parámetros son correctos, se descartaron algunas recomendaciones que no proporcionan a la pieza los requerimientos necesarios para un buen funcionamiento, desde el punto de vista de rigidez, sin tomar en cuenta la manufactura. Los parámetros que presentaron el mejor comportamiento mecánico en el capítulo 3, se aplicaron en el caso de estudio, para un pedal de acelerador de auto, cumpliendo con el objetivo de proponer una serie de parámetros para costillas, para obtener la integridad estructural requerida.

Las conclusiones que se generan de este trabajo, respecto a los parámetros de costillas, son las siguientes: el ángulo de salida (θ), es correcto utilizar un ángulo pequeño, ya que en el caso de las piezas con ángulo de salida mayor se presentó mayor desplazamiento y definitivamente ángulos grandes (de 3°) no son recomendables, ya que se adelgaza el espesor de la costilla, se reduce el momento de inercia y la rigidez; el espesor de la costilla es definitivamente el parámetro al que se le debe tomar mayor atención, se encontró en el trabajo que definitivamente espesores de $0.6T$, registraron un menor desplazamiento, incluso independientemente de la configuración que se le asignó a la pieza.

Como se mencionó anteriormente, la configuración con mejor desempeño son las que no tienen ángulo de salida o menor a 0.5° , sin embargo, desde el punto de vista de manufactura de los moldes de inyección esto no es posible, ya que es necesario que la pieza cuente con el mayor ángulo de salida posible. Lo anterior permite concluir que las guías de diseño para costillas encontradas en la literatura, están basadas principalmente en consideraciones de manufactura, si embargo, no se descarta la posibilidad de trabajar con cortadores de diámetros menores y dureza alta (en el caso de ángulos de salida muy pequeños) o recurrir al proceso de electroerosión, sin embargo, son procesos que requieren más tiempo y el costo es mayor.

Para lograr una mayor integridad estructural, las configuraciones más rígidas son la “B” y la “A”, pero independientemente de los materiales utilizados, se presentó el mismo patrón de deformación en todos los perfiles propuestos, es por ello que se puede concluir que las propiedades mecánicas (en el caso de los plásticos) no es un factor de gran influencia, la mayor aportación a la rigidez esta dada por la configuración, el ángulo de salida y el espesor de la pieza.

Perfiles con espesores menores de 0.6 T de espesor de costilla y ángulo de salida (Θ) grandes, tienen mayor tasa de presión inyección, esto se debe a que en espesores delgados de costilla, el material fluye con mayor dificultad. El análisis de moldeabilidad indicó que el gradiente de presión es constante en la configuración "A" y el área proyectada en B, C y D es mayor, por lo tanto, se presentó mayor presión de inyección y están más propensos a concentraciones de esfuerzos residuales.

Los desplazamientos que se presentaron durante el Análisis de Elemento Finito en el pedal de acelerador fueron grandes y no eran los esperados, ya que por ejemplo, para el material PBT Celanex 1400A se obtiene desplazamientos de hasta 20 mm y en el caso del material reforzado se tienen desplazamientos de 7.8 mm, sin embargo, desde el punto de vista estático, el análisis de factor de seguridad para el material PBT 2360 (30% FG) indica que no falla, presentando un factor de 1.8, donde resulta que la tensión de trabajo es menor a la admisible. En contraste, el material PBT Celanex 1400A, no se recomienda para dicha aplicación, ya que falla estáticamente y tiene un factor de seguridad de 0.9.

Uno de los problemas que se presentó fue, ¿Cómo realizar el análisis de esfuerzo y deformación?, para los componentes metálicos las fallas normalmente están expresadas en términos de esfuerzos dado que la relación con la deformación es lineal (dentro de la zona elástica), incluso, al aplicar una fuerza el componente se deforma, hasta llegar al punto de ruptura. En el caso de los plásticos, al aplicar una fuerza a un componente de material plástico, este se va a deformar, alargándose considerablemente y se fracturará manteniendo la fuerza durante un tiempo largo, es por eso que el análisis de los 36 perfiles de estudio (capítulo 3), se hizo comparando la deformación que sufrió cada perfil, descartando los perfiles que sufrieron mayor deformación, al igual que en el caso de estudio (capítulo 4). Por lo tanto el análisis se hizo por rigidez, sin embargo, la razón por la que se decidió hacer el análisis para obtener el factor de seguridad, fue para saber si falla o no el pedal.

En la parte del caso de estudio, se presentaron problemas en el mallado de la pieza, ya que la geometría del diseño original era complicada y se decidió simplificar secciones del pedal que no eran trascendentes en la estructura y análisis.

La elaboración de este trabajo, aparte de la teoría y conocimiento, a nivel personal y como profesionalista, me dio otros elementos como el uso de software (UG NX5) y comprender concepto

de FEM, que se utilizan como herramientas de trabajo para agilizar y hacer mas eficientes algunos procesos en la industria, simulando la función del ingeniero dentro de la industria en la vida real.

La aportación de este trabajo esta dirigida hacia diseñadores y estudiantes de ingeniería, preocupados por el correcto funcionamiento en piezas de plástico, con los parámetros de costillas que se proponen y que sirven para resolver algunos problemas de rigidez, según los requerimientos y restricciones que presenten las piezas de material plástico.

La aportación que este trabajo da a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, es un argumento más para hacer y proponer ingeniería en el ámbito de diseño y manufactura, como se hizo en el 14 Congreso Internacional anual de la SOMIM (2008).

GLOSARIO

Tabla G-1 .Grado de rigidez, código en perfiles de piezas para material 1 y desplazamiento registrado.

Orden de grado de Deformación	Material 1 Número de perfil	Configuración	Espesor de costilla “t”	Angulo de salida “θ” (°)	Código (Mat. 1)	Desplazamiento del material 1 (mm)
1	12	B	0.6T	0.5	B31	3.989
2	3	A	0.6T	0.5	A31	4.091
3	15	B	0.6T	1.5	B32	4.118
4	6	A	0.6T	1.5	A32	4.208
5	18	B	0.6T	3	B33	4.309
6	9	A	0.6T	3	A33	4.402
7	30	D	0.6T	0.5	D31	4.482
8	11	B	0.5T	0.5	B21	4.53
9	33	D	0.6T	1.5	D32	4.626
10	2	A	0.5T	0.5	A21	4.627

11	14	B	0.5T	1.5	B22	4.692
12	5	A	0.5T	1.5	A22	4.791
13	36	D	0.6T	3	D33	4.827
14	21	C	0.6T	0.5	C31	4.888
15	17	B	0.5T	3	B23	4.966
16	24	C	0.6T	1.5	C32	5.015
17	8	A	0.5T	0.5	A21	5.068
18	27	C	0.6T	3	C33	5.162
19	29	D	0.5T	0.5	D21	5.227
20	10	B	0.4T	0.5	B11	5.27
21	1	A	0.4T	0.5	A11	5.357
22	32	D	0.5T	1.5	D22	5.412
23	13	B	0.4T	1.5	B12	5.542
24	20	C	0.5T	0.5	C21	5.608
25	35	D	0.5T	3	D23	5.618
26	4	A	0.4T	1.5	A12	5.651
27	23	C	0.5T	1.5	C22	5.734

28	26	C	0.5T	3	C23	5.953
29	16	B	0.4T	3	B13	5.966
30	7	A	0.4T	3	A13	6.086
31	28	D	0.4T	0.5	D11	6.196
32	31	D	0.4T	1.5	D12	6.402
33	19	C	0.4T	0.5	C11	6.563
34	22	C	0.4T	1.5	C12	6.759
35	34	D	0.4T	3	D13	6.801
36	25	C	0.4T	3	C13	7.13

Tabla G-2. Grado de rigidez, código en perfiles de piezas para material 2 y desplazamiento registrado.

Orden de grado de Deformación	Material 2 Número de perfil	Configuración	Espesor de costilla “t”	Angulo de salida “θ”(°)	Código (Mat.2)	Desplazamiento del material 2 (mm)
1	12	B	0.6T	0.5	B31	10.496
2	3	A	0.6T	0.5	A31	10.752
3	15	B	0.6T	1.5	B32	10.835
4	6	A	0.6T	1.5	A32	11.059
5	18	B	0.6T	3	B33	11.339
6	9	A	0.6T	3	A33	11.57
7	30	D	0.6T	0.5	D31	11.774
8	11	B	0.5T	0.5	B21	11.92
9	33	D	0.6T	1.5	D32	12.148
10	2	A	0.5T	0.5	A21	12.161
11	14	B	0.5T	1.5	B22	12.348
12	5	A	0.5T	1.5	A22	12.592

13	36	D	0.6T	3	D33	12.674
14	21	C	0.6T	0.5	C31	12.835
15	17	B	0.5T	3	B23	13.069
16	24	C	0.6T	1.5	C32	13.167
17	8	A	0.5T	0.5	A21	13.319
18	27	C	0.6T	3	C33	13.553
19	29	D	0.5T	0.5	D21	13.727
20	10	B	0.4T	0.5	B11	13.871
21	1	A	0.4T	0.5	A11	14.079
22	32	D	0.5T	1.5	D22	14.21
23	13	B	0.4T	1.5	B12	14.588
24	20	C	0.5T	0.5	C21	14.723
25	35	D	0.5T	3	D23	14.75
26	4	A	0.4T	1.5	A12	14.854
27	23	C	0.5T	1.5	C22	15.055
28	26	C	0.5T	3	C23	15.63
29	16	B	0.4T	3	B13	15.706

30	7	A	0.4T	3	A13	15.996
31	28	D	0.4T	0.5	D11	16.266
32	31	D	0.4T	1.5	D12	16.807
33	19	C	0.4T	0.5	C11	17.238
34	22	C	0.4T	1.5	C12	17.748
35	34	D	0.4T	3	D13	17.853
36	25	C	0.4T	3	C13	18.723

Tabla G-3. Numero de elementos y numero de nodos en mallado de piezas donde el tamaño de malla es de 1.5.

No. de pieza	No. de elementos en el mallado	No. de nodos	No. de pieza	No. de elementos en el mallado	No. de nodos
1	49032	85546	19	48337	84542
2	51785	89180	20	51970	88975
3	54374	92366	21	54579	92101
4	28670	58450	22	45565	80500
5	50099	86542	23	50009	85997
6	52025	89275	24	52826	89575
7	44952	79870	25	42368	75538
8	49086	85153	26	48275	48275
9	52866	90383	27	51866	88448
10	52819	92290	28	59261	103195
11	56251	96098	29	62611	106307
12	58956	99807	30	61910	104485
13	51818	91315	31	56469	99325
14	54959	94425	32	60568	103411
15	57370	97111	33	61264	103273
16	52701	93784	34	51836	92163
17	53061	91894	35	58295	100288

Tabla G-4. Propiedades físicas de PBT Celanex 1400 [23].

<i>Propiedades físicas</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Pruebas estandar</i>
Densidad	1258.6	Kg/m ³	ISO 1183
Absorción de agua (23°C-sat)	0.08	%	ISO 62
Modulo elástico	2700	MPa	ISO 527-2/1A
Esfuerzo de Cedencia (50mm/min)	60	MPa	ISO 527-2/1A
Tensión nominal de rotura (50mm/min)	38	%	ISO 527-2/1A
Modulo de flexión (23°C)	2200	MPa	ISO 178
Fuerza de flexión (23°C)	80	MPa	ISO 178
Dureza Rockwell	72	M-ESCALA	ISO 2039-2
Temperatura de fundición (10°C/min)	225	°C	ISO 11357-1,-2,-3
Temperatura de transición de vidrio (10°C/min)	60	°C	ISO 11357-1,-2,-3
Temperatura de fundición durante la inyección	243	°C	ISO 294
Temperatura del molde de inyección	82	°C	ISO 294
Velocidad de inyección	300	mm/s	ISO 294
Presión de mantenimiento durante la inyección	48	MPa	ISO 294

Tabla G-5. Propiedades físicas de PBT con 30% de fibra de vidrio [20].

<i>Propiedades físicas</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Densidad	1518.9	kg/m ³
Absorción de agua	25.0 - 30.0	%
Modulo Elástico	7600	MPa
Esfuerzo de Cedencia	120	MPa
Constante dieléctrica	3 - 5	
Modulo de Flexión (40-150°C)	2.758 - 9.31	GPa
Fuerza de Flexión (40-150°C)	75 - 286	MPa
Resistividad Eléctrica	1e13 – 1.30e18	Ohm-cm
Temperatura de procesamiento	220 - 271	°C
Temperatura del molde de inyección	30 - 180	°C
Tamaño del disparo	30 - 80	%
Presión de inyección	4.96 - 124	MPa

BIBLIOGRAFIA

- [1] Krishnamachari S.I. *Applied stress analysis of plastics*. Editorial Van Nostrand Reinhold. Nueva York 1993.
- [2] Savgorodny V. K. *Transformación de plásticos*. Editorial Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1978.
- [3] Mink, Walter. *El plástico en la industria, tratado práctico de inyección de plásticos 1*. Editorial Gustavo Gili, S.A. de C.V. México, 1990.
- [4] Gordon M., Joseph Jr. *Total quality process control for injection molding*. 1ª Edición. Editorial Carl Hanser Verlag. Munich, Alemania, 1993.
- [5] Robert A. Malloy. *Plastic part design for injection molding*. Editorial HANSER . Nueva York 1994.
- [6] Manual de Diseño de DUPONT. DuPont Engineering Polymers. *General Design Principles for DuPont Engineering Polymers*.
- [7] Manual de Diseño de TICONA. Engineering Plastics . C.3.4 *Guidelines for the design of moldings in engineering plastics..*
- [8] Manual de Diseño de TICONA: *Designing With Plastic*.
- [9] DSM: http://www.dsm.com/en_US/html/home/dsm_home.cgi.
- [10] GE Plastic: *Injection Molding Design Guidelines*.
- [11] NISA II. *Verification problems manual*. Editorial: Engineering mechanics research corporation. Michigan U.S.A.1990
- [12] http://www.efunda.com/designstandards/plastic_design/plastic_intro.cfm.
- [13] L. Robert Weckman. *Diagonal Ribs Increase torsional rigidity*. Revista (Engineering Design". 1988.

- [14] http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/design/part/33000003.htm.
- [15] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6300>.
- [16] http://www.efunda.com/designstandards/plastic_design/plastic_intro.cfm.
- [17]. A Gordillo 2007.
- [18] D.H. Morton-Jones. *“Procesamiento de plásticos”*. Limusa Noriega Editores. 1993 primera Edición.
- [19]. S.S.S Imihezri, S.M. Sapuan, S. Sulaiman, M.M. Hamdan, E.S. Zainuddin, M.R. Osman, M. Z. A. Rahman *“Mould flow and component design análisis of polymeric based composite automotive clutch pedals”*, Departamento de Ingeniería mecánica y manufactura de la Universidad Putra Malasia. Junio del 2005.
- [20] www.matweb.com.
- [21] http://ing.unne.edu.ar/pub/e2_cap1.pdf.
- [22] http://www.jamplast.com/plastic_supplier_PBT.htm.
- [23] <http://tools.ticona.com/tools/mcbasei/pdf/printpdf.php>.
- [24] <http://www.mailxmail.com/curso/vida/inyecciondeplasticos/capitulo5.htm>.