



**ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE  
CALOR  
EN OPERACIONES DE MOLDEO  
DE PLÁSTICO UTILIZANDO  
DIFERENCIAS FINITAS**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN  
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. MAURICIO LENDIZABAL NÉSTOR  
ASESOR: DR. CARLOS JUÁREZ TOLEDO**

LERMA, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE, 2019.



**ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR  
EN OPERACIONES DE MOLDEO  
DE PLÁSTICO UTILIZANDO DIFERENCIAS  
FINITAS**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar un minuto, no para pedir nada de ti, simplemente para decirte gracias por todo lo que tengo, volteo al cielo y digo "Sé que fuiste Tú". Gracias **Dios Padre**, por estar siempre a mi lado.

A mi familia (padre, madre(t), hermanas(os), sobrinas(os), cuñadas(os), suegra(o)). Por la inspiración y aliento a cumplir una meta más en mi vida.

A mi esposa Cuquita. Tu amor es uno de esos milagros que pasa solo una vez en la vida. Y pasaste en la mía, eres mi alegría e ilusión. Como una forma de retribuir el inmenso amor y apoyo que siempre me das.

A mis hijos Mauricio Hasen, Néstor Lucían y Avril Regina. Por darme la oportunidad de ser su guía en este hermoso camino de la vida. *Nunca permitas que nadie te diga que no puedes hacer algo. Ni siquiera yo. Si tienes un sueño, tienes que protegerlo. Si quieres algo ve por ello y punto.*

Al Dr. Carlos Juárez Toledo, por sus comentarios e importantes sugerencias técnicas y metodológicas de este trabajo y sobre todo por su paciencia.

A mi revisor de tesis M. en I. Miguel Ángel López Arriquivéz, por sus importantes sugerencias al revisar este trabajo y sobre todo por su disposición.

Al Centro de Tecnología Avanzada, CIATEQ, por brindarme la oportunidad de formarme como Maestro.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico durante la maestría.



# CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



20 de mayo de 2019

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. Mauricio Lendizabal Néstor, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "Análisis de la Transferencia de Calor en Operaciones de Moldeo de Plástico utilizando Diferencias Finitas", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 20 días del mes de mayo del 2019.

Dr. Carlos Juárez Toledo  
Grado y nombre completo  
Asesor Académico

\_\_\_\_\_  
Grado y nombre completo  
Asesor en Planta

# CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR

Hermosillo, Sonora, 11 de noviembre del 2019.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero  
Directora de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno MAURICIO LENDIZABAL NÉSTOR, cuyo título es:

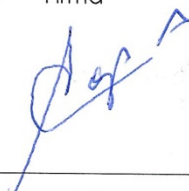
ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN OPERACIONES DE MOLDEO DE PLÁSTICO UTILIZANDO DIFERENCIAS FINITAS

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma



---

MI. Miguel Ángel López Arriquivez

## RESUMEN

Se tiene conocimiento que la aproximación a un problema físico mediante diferencias finitas mejora cuantos más pequeños sean los incrementos  $\Delta x$  y  $\Delta y$  utilizados. Pero no se ha dicho cómo estimar la precisión de esta aproximación. Se dispone del siguiente enfoque: elegir progresivamente valores más pequeños de  $\Delta x$ , realizar la selección adecuada del tipo de mallado en Ansys Fluent (hexaedros o tetraedros) y analizar el comportamiento de la solución. Si el problema se ha formulado y resuelto correctamente, los valores en la temperatura deberían converger. Se tomara en cuenta que la solución se hace compleja cuando aumenta el número de elementos, nodos y según se haya elegido una malla del tipo hexaedros o tetraedros.

El proceso requiere una etapa preliminar llamada calibración, esta etapa nos permite determinar los parámetros que garanticen la convergencia de la solución. Algunos de estos parámetros son: geometría, malla, régimen del solver, modelos, materiales, parámetros numéricos, iteraciones (en régimen estacionario o transitorio), variables a evaluar o monitorear ( $T^\circ$ , P, v, fases, turbulencias, etc).

La técnica ocupada tiene que ver con volumen finito, eso significa que se emplearon algoritmos de solución basados en presión o densidad para solucionar los campos de velocidad. Se modelo el proceso de llenado en dos dimensiones, asumiendo un flujo no Newtoniano en condiciones de estado transitorio y laminar. El problema se simplificó a un dominio 2D del bloque, se asumió un comportamiento no Newtoniano del polímero, gobernado por la ecuación de viscosidad de Carreau. En particular el ABS puede ser descrito mediante el modelo de Cross/Carreau cuyo comportamiento logarítmico indica el descenso de la viscosidad cuando la velocidad de corte aumenta para un determinado tipo de polímero.

**Palabras Clave:** Ingeniería y tecnología, Tecnología de materiales, Plásticos, Diferencias Finitas, Ansys.

## **ABSTRACT**

It is known that the approximation to a physical problem by means of finite differences improves the smaller the increments  $\Delta x$  and  $\Delta y$  used. But it has not been said how to estimate the precision of this approach. The following approach is available: progressively choose smaller values of  $\Delta x$ , make the appropriate selection of the type of mesh in Ansys Fluent (hexahedrons or tetrahedra) and analyze the behavior of the solution. If the problem has been formulated and solved correctly, the values in the temperature should converge. It will be taken into account that the solution becomes complex when the number of nodes, elements increases and as a mesh of the hexahedron or tetrahedron type has been chosen.

The process requires a preliminary stage called calibration; this stage allows us to determine the parameters that guarantee the convergence of the solution. Some of these parameters are: geometry, mesh, solver regime, models, materials, numerical parameters, iterations (in stationary or transitory regime), variables to be evaluated or monitored ( $T$ ,  $P$ ,  $v$ , phases, turbulence, etc.). Carreau-WLF.

In particular the ABS can be described by the Cross / Carreau model whose logarithmic behavior indicates the decrease in viscosity when the cutting speed increases for a certain type of polymer.

**Keywords:** Engineering and technology, Materials technology, Plastics, Finite Differences, Ansys.



# INDICE DE CONTENIDO

	Pag.
AGRADECIMIENTOS	II
CARTA LIBERACIÓN ASESOR	III
CARTA LIBERACIÓN REVISOR	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INDICE DE CONTENIDO	VII
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	X
GLOSARIO	XI
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.5 HIPOTESIS	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.2 CARACTERISTICAS DE LOS PLÁSTICOS	9
2.2.1 TERMOPLÁSTICOS AVANZADOS	13
2.2.2 TERMOPLÁSTICOS DE INGENIERÍA	14
2.2.3 TERMOPLÁSTICOS DOMESTICOS	14
2.3 INYECCIÓN Y MOLDEO DE PLÁSTICO	16
2.3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOLDEO	17
2.3.2 BENEFICIOS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO	19
2.3.3 MATERIALES UTILIZADOS PARA FABRICAR MOLDES	20
2.3.4 PARTES DEL MOLDE	21
2.3.5 PARÁMETROS BÁSICOS EN EL PROCESO DE INYECCIÓN	21
2.4 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS	22
2.4 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (FEM)	27
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	29
3.1 MÉTODO	30
3.1.1 CALIBRACIÓN DE UNA SIMULACIÓN PARA INYECCIÓN DE PLÁSTICO ABS	30
3.1.2 METODOLOGIA PARA CALIBRAR PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	31
3.1.3 MALLADO	33

3.1.4	PREPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN	33
3.2	MODELOS DE VISCOSIDAD	34
3.3	VENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO DE CROSS/CARREAU	35
3.4	DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO DE CROSS/CARREAU	36
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		39
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
CONCLUSIONES		41
APORTACIÓN DE LA TESIS		43
RECOMENDACIONES		44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		45

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. ABS Formado por dos copolímeros SAN y BS .....	11
FIGURA 2. Termoplásticos de Aplicación Industrial .....	13
FIGURA 3. Termoplásticos Avanzados .....	13
FIGURA 4. Elementos del Proceso de Inyección .....	18
FIGURA 5. Nomenclatura en Diferencias Finitas .....	23
FIGURA 6. Etapas del proceso de calibración .....	30
FIGURA 7. Molde de Inyección de pieza de análisis .....	31
FIGURA 8. Dominio 3D de la pieza de análisis CFD .....	32
FIGURA 9. Dominio 2D de la pieza de análisis .....	32
FIGURA 10. Condiciones de frontera del dominio 2D .....	32
FIGURA 11. Hexaedros como elementos de mallado .....	33
FIGURA 12. Escala de residuales .....	38
FIGURA 13. Contorno de velocidad a 1.0 s .....	38
FIGURA 14. Contorno de velocidad a 2.0 s .....	38
FIGURA 15. Contorno de velocidad a 3.0 s .....	39
FIGURA 16. Contorno de la fase a 1.0 s .....	39
FIGURA 17. Contorno de la fase a 2.0 s .....	39
FIGURA 18. Contorno de la fase a 3.0 s .....	39

## INDICE DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. Plástico ABS Estándar	12
TABLA 2. Propiedades Reológicas del Lustran ABS Elite HH 1827	12
TABLA 3. Clasificación de los plásticos	15
TABLA 4. Datos experimentales de polímero ABS	35
TABLA 5. Controles para el caso multifásico	36

## GLOSARIO

**Convergencia:** es el equilibrio entre los residuales, variables y balances de masa y energía.

**Diferencia Finita:** se basan en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales por ecuaciones algebraicas. En el caso del popular método de diferencias finitas, esto se realiza al reemplazar las derivadas por diferencias.

**Geometría:** elemento que se ha seleccionado para (dominio) realizar el análisis térmico.

**Iteraciones:** Repetir el proceso para generar una secuencia de resultados, con el objetivo de aproximarse a un resultado deseado.

**Malla:** es el tipo de discretización espacial en la geometría de estudio (dominio), estructurada por celdas y nodos.

**Nodo:** puntos de análisis ubicados en la geometría que se ha discretizado, puede ser central, de contorno o en esquina.

**Residual:** son una herramienta a la hora de controlar la convergencia durante el proceso iterativo, de manera general, representa la diferencia entre los valores de las variables a resolver entre dos iteraciones, si los residuales permiten la convergencia, el sistema se estabiliza.

**Volumen finito (FVM):** Es un método alternativo que nos permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales, es alternativo al de diferencias finitas y elementos finitos. A groso modo, podemos clasificar los distintos esquemas de discretización en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Estos métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial).

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

La inyección resulta ser uno de los procesos que más se utiliza al manufacturar piezas plásticas: el proceso toma lugar en el interior del molde de inyección, el cual se compone de varios sistemas, como el atemperamiento que es uno de los más importantes. El tema ha sido abordado en investigaciones que refieren metodologías para el enfriamiento de moldes de inyección, con la finalidad de obtener piezas plásticas en el margen de las especificaciones del producto, sin embargo, la actualidad sugiere el uso de programas computacionales que permitan realizar el proceso simulado, calibrando los parámetros de operación (1).

Para el proceso de simulación en Ansys aplicaremos como guía el modelo matemático de *Cross/Carreau* ya establecido en el software y que nos apoyará a realizar la simulación (*Ansys Fluent*), tomando como materia prima el termoplástico Lustran ABS Elite HH 1827. La intención del presente trabajo es proponer una metodología de calibración para realizar el análisis térmico en operaciones de moldeo por inyección de plástico usando la técnica de diferencias finitas por conducción en estado estable con incrementos en  $\Delta x$  y  $\Delta y$ ; es decir, cómo se modifica el mallado, en las partes involucradas del proceso, con la intención de predecir la deformación y contracción. Para conocer la confiabilidad de los incrementos seleccionados, se valida la respuesta térmica en un molde de inyección mediante el software *Ansys Fluent* que muestra la evolución de los contornos de velocidad y fase.

El proceso de diseño basado en simulación numérica se ha fortalecido en los últimos años, los avances en la escritura de algoritmos que gobiernan fenómenos físicos son significativos y hoy en día existen diversos productos en el mercado que han sido creados como trajes a la medida para la solución de problemas en ingeniería aplicada e investigación.

Aunado a los avances en el desarrollo de software para simulación numérica de fenómenos físicos (mecánicos, fluidos, transferencia de calor, entre otros), se tiene conocimiento sobre el desarrollo de capacidades para el procesamiento en paralelo,

esto significa que de igual forma el hardware ha evolucionado para permitir solucionar mucho más rápido las simulaciones. Algunos software comerciales como ANSYS Fluent funcionan como una herramienta muy poderosa para solucionar problemas de flujo de fluidos, pero debido a la robustez de sus modelos, éste software no considera simplificaciones que pudieran acelerar una simulación de inyección de plástico, a diferencia de otros productos que han sido creados como trajes a la medida para dicho propósito.

Cada uno de esos productos tiene la versatilidad para que el usuario ingrese parámetros típicos de los procesos de inyección de plástico, como son:

- Gastos máxicos
- Velocidades de fluido
- Temperaturas
- Presiones
- Ductos y fluidos de enfriamiento
- Materiales del molde
- Fluido de inyección con sus propiedades de viscosidad dependientes de alguna variable.
- Tiempos y/o secuencias de proceso, etc.

Y como resultados, se tienen variables típicas que los diseñadores sabrán interpretar para considerar que un molde producirá un producto de calidad, tomando en consideración los contornos de temperatura y presión que proporcionan información de deformaciones, ondulaciones, rechupes, marcas de extracción entre otros.

El diseño basado en simulación numérica ha demostrado ser una buena alternativa para reducir costos, y aunque la inversión inicial típicamente es alta, un buen análisis costo-beneficio podría solucionar la incertidumbre del inversionista.

Los problemas prácticos de análisis térmico con frecuencia son muy complicados y no se pueden resolver mediante métodos analíticos. Sus modelos matemáticos pueden incluir ecuaciones diferenciales no lineales con condiciones de frontera complejas. No obstante, estos problemas se pueden resolver mediante métodos numéricos

computacionales que incluyen, entre otros, métodos de diferencias finitas, de elementos finitos y de elementos de frontera. El análisis numérico es más eficiente en términos del tiempo total necesario para encontrar la solución (2) .

Se tiene conocimiento que la aproximación a un problema físico resuelto por diferencias finitas se podrá mejorar si se hacen más pequeños los incrementos en  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . Lo anterior, nos permite suponer que si utilizamos una herramienta computacional basada en mallado por consiguiente Ansys Fluent nos ayude a mejorar la aproximación del modelo de estudio (3).

El tema ha sido abordado en múltiples investigaciones que refieren aspectos térmicos en procesos de moldeo, con la finalidad de obtener piezas plásticas en el margen de las especificaciones del producto, tal como se mencionan a continuación:

Sainfullah y Masood compararon diferentes canales de enfriamiento para un molde de inyección de un recipiente de polipropileno. Primeramente, se realizó una corrida, considerando el sistema en estado estacionario para obtener las distribuciones de temperaturas en las superficies de intercambio del molde; luego, realizaron el mismo análisis dependiente del tiempo con el objetivo de obtener la duración del enfriamiento de la pieza fundida (4).

Fonseca, Pelliccioni, Osswald y Aquite, analizaron la simulación del llenado del moldes con el uso del software OpenFOAM®, que les permitió evaluar el desempeño en problemas de moldeo por inyección. La simulación se realizó en la etapa de llenado de un molde de una sola cavidad (en 2D), bajo el régimen laminar y utilizando la ecuación Cross-Exponencial para estimar el comportamiento de la viscosidad de un polímero termoplástico (5).

Lo expuesto en las líneas anteriores muestra la importancia de contar con una metodología de calibración al realizar operaciones de inyección de piezas plásticas que permita comparar canales de inyección de un molde, describir el diseño de un sistema de enfriamiento apoyándose en el método de los elementos finitos, analizar la relación existente entre la configuración de los canales de enfriamiento, los parámetros del



proceso, material del molde, espesor de las placas del molde y finalmente llegar a la simulación del proceso de inyección. En este trabajo, se utilizó el método de diferencias finitas para el análisis térmico del molde de inyección estudiado, con el objetivo de evaluar los parámetros de operación y calibración que permita realizar el análisis térmico en el molde y calcular el tiempo y velocidades de llenado necesario para las piezas fabricadas.

Varios problemas térmicos no son susceptibles de una solución analítica, ya que son representados por ecuaciones algebraicas y diferencias complejas; por ejemplo, en el caso de las diferencias finitas, estas se resuelven reemplazando las derivadas por diferencias numéricas (6). Durante el análisis térmico, se describen con precisión las condiciones de frontera responsables de las tensiones térmicas inducidas en las piezas, con esto es posible tener una aproximación del comportamiento de la pieza plástica dentro del molde (2).

Entre los diferentes procesos de transformación que involucra temperatura o presión (inyección, extrusión, soplado y vacío, principalmente) destaca el proceso de inyección, que permite obtener productos terminados a la salida de la máquina sin la necesidad de realizar alguna otra operación para obtener el producto terminado. Lo anterior, muestra que los materiales plásticos están desplazando a los materiales metálicos, madera, cerámicos, vidrios y que era común encontrar en utensilios de cocina, herramientas, piezas industriales piezas automotrices en entre otros(7).

El diseño de moldes de inyección de plástico requiere un conocimiento preciso de la forma en que opera el equipo, las propiedades del fluido y sobre todo una suficiente experiencia para definir la configuración del molde y condiciones de operación. Gracias a la experiencia adquirida por los diseñadores, se obtiene un gran porcentaje del éxito. La pieza plástica de este trabajo está hecha con un material tomado como ilustrativo que cumple con las características necesarias para simular el proceso; por lo anterior, no se ha realizado una simulación con otros polímeros. Este material es el termoplástico Lustran ABS Elite HH 1827 que se analiza como un fluido no newtoniano con fijaciones de ajuste rápido y, se utiliza un canal caliente en el proceso. Se realiza la calibración de un

análisis de simulación basado en la metodología de Ansys Fluent, el canal y la pieza son simulados suponiendo un estado transitorio.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Como se dijo anteriormente, un diseño basado en simulación numérica ha demostrado ser una buena alternativa que permite reducir costos generados por un mal diseño, mala elección del material o variables de operación mal consideradas. Las técnicas de prueba y error ya no están siendo utilizados debido a los altos costos y el tiempo excesivo requerido. Sin embargo, el uso cada vez más generalizado de computadoras ha dado como resultado que las técnicas de simulación numérica sean muy importantes para resolver este tipo de problemas. Contrario a la formulación analítica, en el análisis de diferencias finitas se considera que el sistema en estudio está compuesto por elementos de volumen muy pequeño pero finito. Es decir, los componentes finitos empleados para obtener el modelo matemático son una aproximación de los elementos diferenciales usados en la formulación analítica (8).

Proponemos una metodología de calibración para realizar el análisis térmico en operaciones de moldeo por inyección de plástico usando la técnica de diferencias finitas por conducción en estado estable con incrementos en  $\Delta x$  y  $\Delta y$ ; es decir, cómo se modifica el mallado, en las partes involucradas del proceso, con la intención de predecir la deformación y contracción. Para conocer la confiabilidad de los incrementos seleccionados, se valida la respuesta térmica en un molde de inyección mediante el software Ansys Fluent que muestra la evolución de los contornos de velocidad y fase.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Vale la pena desarrollar el análisis térmico en procesos de moldeo de plásticos por dos razones: calibración del proceso térmico que involucra las variables temperatura, tiempo de inyección, velocidad de inyección, lo anterior, permite obtener mejores piezas que no reflejen el alabeo, manchas, deformación y contracción. De manera implícita esta referida la reducción de costos generados por un mal diseño, mala elección del material

o variables de operación mal consideradas. Las técnicas de prueba y error ya no están siendo utilizados debido a los altos costos y el tiempo excesivo requerido.

Para aumentar la capacidad de una empresa al desarrollar piezas sofisticadas, se está optando por el diseño y simulación por computadora, de esta manera, se toman mejores decisiones, se invierte más tiempo en diseño y menos tiempo en el proceso para generar ahorros al evitar los costos de la fabricación física de moldes y piezas,

La intención del presente no tiene por objetivo demostrar la reducción de costos ni el impacto ambiental ocasionado por las técnicas de prueba y error realizadas, sino mostrar la metodología de calibración para un proceso de inyección de piezas plásticas utilizando Ansys Fluent como una herramienta basada en modelos matemáticos relacionados con la viscosidad del material plástico para realizar la simulación del proceso antes de ordenar la producción.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Diseñar una metodología de calibración para el análisis térmico en operaciones de moldeo de plástico utilizando la técnica de diferencias finitas por conducción en estado transitorio, lo que permitirá calcular el tiempo de llenado en el molde.

### **Objetivos específicos**

- Identificar la geometría adecuada para realizar el proceso de simulación: 2D o 3D.
- Seleccionar el modelo matemático de viscosidad que gobierne el fenómeno en cuestión.
- Comprobar los parámetros numéricos ( $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $m$ ) que ajusten a los modelos matemáticos de viscosidad.
- Establecer el tipo y calidad de elementos adecuados para el dominio.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Utilizar el modelo de Cross – Carreau para realizar la simulación numérica permitirá lograr la convergencia de los valores residuales a las 125 000 iteraciones en un tiempo de 3 segundos.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En los últimos 100 años se han acumulado un gran número de soluciones analíticas de problemas de análisis térmico, aún así, en muchas situaciones prácticas, la geometría o las condiciones de contorno son tales que no se ha obtenido una solución completa, o, si la solución se ha desarrollado, implica soluciones en series tan complicadas que su evaluación numérica es extremadamente difícil. Para estas situaciones, la aproximación más acorde al problema es la que se basa en la técnica de diferencias finitas, utilizada para aproximar incrementos diferenciales en la temperatura y en las coordenadas espaciales; cuanto más pequeños se elijan los incrementos, más se aproximara la distribución de temperaturas real (9).

La técnica de diferencias finitas se ha convertido actualmente en una técnica estándar que por la sencillez de su configuración y la rapidez de sus resultados se ha ganado un lugar especial en el conjunto de las técnicas utilizadas para realizar la determinación de las propiedades térmicas de las sustancias. Una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para la obtención de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) es la de diferencias finitas por la razón que nos atañe en el cálculo de un sólido (moldes de inyección de plástico).

El análisis del proceso de inyección de plástico y sus fases tiene en la actualidad un conjunto de herramientas digitales: dibujo asistido por computadora (CAD), análisis por computadora (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM) que permiten determinar las condiciones idóneas para el procesado de materiales plásticos. Estas herramientas principalmente son de forma gráfica y numérica todo este proceso mediante algoritmos basados en el modelo de elementos finitos, desde el diseño de la pieza 3D, identificación de los puntos de inyección, bases de molde, clavijas, eyectores, elevadores, manguitos, guías y dispositivos de alineación, hasta la simulación de inyección. Cada vez es más necesario contar con estas herramientas debido al uso de piezas de plástico en casi todas las industrias, la necesidad de reducir costos y los tiempos de producción.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PLÁSTICOS

Los plásticos son materiales derivados del petróleo o hechos de manera artificial que pueden ser encontrados en fibras, rellenos, pigmentos y otros materiales similares que mejoran aún más sus propiedades. Entre los plásticos se encuentran los termoplásticos (Polipropileno, polietileno, PVC, acrílicos), termoestables (Poliuretano, baquelita, poliéster) y elastómeros (caucho, neoprenos). Estos plásticos son elegidos en base a los requerimientos de ingeniería con respecto a fatiga, resistencia química y otras propiedades físicas. Los plásticos se usan en una gran cantidad de aplicaciones que incluyen prendas de vestir, juguetes, enseres domésticos, elementos estructurales y decorativos, adhesivos, neumáticos, materiales biomédicos, piezas automotrices, espumas y empaques, posiblemente los plásticos se usan en más campos de actividad tecnológica que cualquier otra clase de materiales, esto se debe principalmente por ser ligeros, durables y fáciles de moldear (7).

Los plásticos tienen propiedades que los caracterizan como su elasticidad, maleabilidad, alta resistencia mecánica, no sufren de corrosión, entre otras propiedades. Estas se pueden mejorar al modificar las proporciones de la materia prima para generar plásticos con diferentes propiedades o hacer mezclas entre diferentes polímeros para mejorar sus propiedades, por ejemplo: rigidez, elasticidad, temperaturas de fusión, de igual manera se pueden combinar con fibras como es el caso de la fibra de vidrio o fibra de carbono para mejorar su resistencia y de esta manera tener materiales más duros que puedan sustituir metales en ciertas aplicaciones (10).

Los plásticos se han convertido en uno de los principales materiales para la fabricación de multitud de artículos, característica clave para entrar en un gran número de mercados y aplicaciones, sin disminuir el dinamismo que siempre ha poseído este sector. Los plásticos se clasifican de varias formas: según la síntesis de sus moléculas, su estructura molecular o por la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar a los polímeros es establecer si se trata de un polímero lineal (formado de cadenas moleculares en forma de espagueti) o de un polímero ramificado (hay cadenas primarias y secundarias llamadas ramales).

Los plásticos son polímeros. No todos los polímeros son plásticos, por ejemplo, el colágeno, el ADN, son polímeros pero no son plásticos. Los plásticos son polímeros derivados del petróleo y existen algunos naturales y otros semi-naturales. Naturales es por ejemplo la resina de los pinos, seminaturales es por ejemplo el acetato de celulosa la cual se forma de celulosa natural y ácido acético derivado del petróleo. Para nuestro caso de estudio trabajaremos con un plástico derivado del petróleo y lo llamaremos plástico.

Una manera más adecuada de describir los plásticos es en función de su comportamiento mecánico y térmico, esto es:

Los **termoplásticos** están formados de cadenas largas que se producen al unir monómeros; por lo general se comportan de manera plástica y dúctil, pueden ser amorfos o cristalinos, al calentarse se ablandan y funden. Se procesan en ciertas formas calentándolos a altas temperaturas, se pueden reciclar fácilmente.

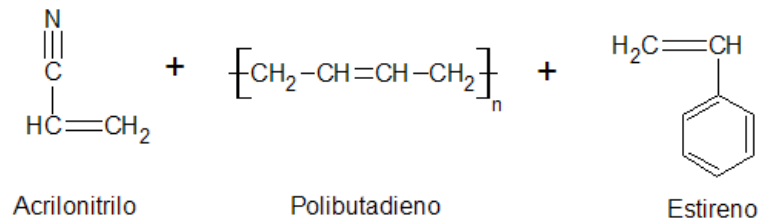
Los **termoestables** están constituidos por cadenas largas de moléculas fuertemente unidas por enlaces cruzados y entrelazados para formar estructuras tridimensionales de red. Por lo general son fuertes, pero más frágiles que los termoplásticos, los termoplásticos no se funden al calentarlos sino que comienzan a descomponerse.

Los **elastómeros** tienen una deformación elástica superior a 200%, es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrelazados. Los elastómeros también reciben el nombre de cauchos.

Los **elastómeros termoplásticos** son un grupo especial de polímeros; su procesamiento es tan fácil como el de los termoplásticos y su comportamiento elástico es semejante al de los elastómeros.

Dentro de los termoplásticos se forman los copolímeros, es una forma muy poderosa de combinar las propiedades de diferentes polímeros, la copolimerización produce el polímero ABS, que en realidad está formado por dos copolímeros, SAN y BS, injertados uno en el otro. Como se muestra en la figura 1, el ABS, compuesto por Acrilonitrilo, Butadieno (elastómero sintético) y Estireno. Contiene dos copolímeros: el Estireno y el Acrilonitrilo, que forman un copolímero lineal (SAN) que sirve como matriz. El Estireno y

butadieno también forman un copolímero lineal, el caucho BS, que actúa como material de relleno (7).



**Fig.1** ABS formado por dos copolímeros SAN y BS (7)

¿Por qué se usa tan frecuentemente el ABS?

El ABS tiene una fuerte resistencia a productos químicos corrosivos y/o impactos físicos. Es muy fácil de mecanizar y tiene una temperatura de fusión baja 518 K (245 °C) que lo hace particularmente fácil de usar en procesos de fabricación de moldeo por inyección o impresión 3D en una maquina FDM (Modelado por Deposición Fundida). Entre las innumerables aplicaciones identificadas para el ABS están las teclas del teclado, carcasa de herramientas eléctricas, protector de plásticos y los juguetes LEGO.

El ABS es estructuralmente robusto, por lo que se utiliza en artículos que requieren resistencia al impacto; cámaras, carcasas protectoras y envases (11), (12).

ABS son las siglas (en inglés) de Acrilonitrilo, Butadieno y Estireno, los tres monómeros que constituyen este **polímero termoplástico**. Es, por tanto, un copolímero, en el que cada molécula ofrece una serie de cualidades o propiedades al material:

- El Acrilonitrilo proporciona dureza, estabilidad térmica y resistencia química.
- El Butadieno es un elastómero y aporta resistencia frente a la deformación en un amplio rango de temperaturas (evitando que se vuelva quebradizo).
- El Estireno aporta rigidez y resistencia mecánica.

En suma, el ABS es un polímero de gran resistencia y versatilidad en sus aplicaciones, que van desde la automoción al ámbito doméstico, las características y los valores típicos se muestran en la tabla 1.



**Tabla 1.** Plástico ABS Estándar (11) (13)

Característica	Valor típico
Nombre Técnico	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)
Formula química	$(C_8H_8)_x (C_4H_6)_y (C_3H_3N)_z$
Temperatura de moldeo	533 K (260 °C)
Temperatura de transición vítrea	373 K (100 °C)
Resistencia a la tracción	46 MPa
Fuerza Flexible	74 MPa
Gravedad Especifica	1.06
Tasa de reducción	0.5 – 0.7%

De las propiedades reológicas mostradas en la siguiente tabla el MFI (Índice de Fluidez Másico) es la más importante para definir la calidad del polímero en cuanto a fluidez (13).

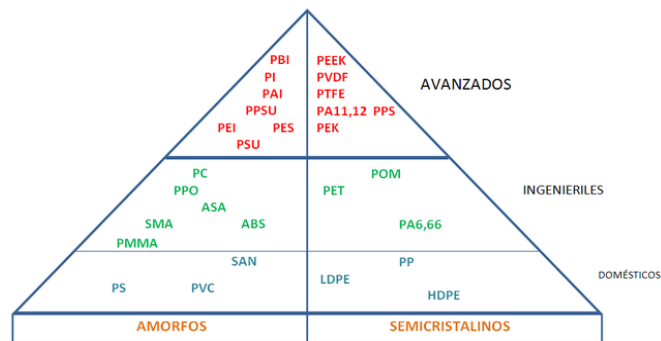
**Tabla 2.** Propiedades reológicas del *Lustran ABS Elite HH 1827* (14)

Propiedad	Valor
Densidad (M,F)	0.93 g/cm <sup>3</sup>
Índice de Fluidez (M.F.I)	13 g/10min
Esfuerzo de cizalla máx ( $\tau_{max}$ )	0.28 MPa
Velocidad de cizalla máx ( $\gamma_{max}$ )	50 000 1/s
Índice de comportamiento (n)	0.2862

Desde un punto de vista teórico, el flujo del polímero fundido en el moldeo por inyección resulta un problema reológico muy complejo. Se trata del flujo de un líquido no newtoniano, compresible y que fluye a través de canales de geometría complicada, cuyas paredes están mucho más frías que el polímero. Describiremos las diferentes etapas por las que pasa el material desde que abandona la cámara de plastificación hasta que se extrae la pieza del molde, y del efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada. Las tres variables fundamentales que rigen el comportamiento del material dentro del molde son temperatura, presión y tiempo.

Para el caso de estudio se trabajara con el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (*Lustran ABS Elite HH 1827*) que es un polímero termoplástico opaco y amorfo, que se caracteriza por una excelente fluidez y estabilidad durante el llenado. Tienen una transición vítrea a cierta temperatura (373 K (100 °C)) puede calentarse hasta la temperatura recomendada de 533 K (260 °C) para la masa fundida y 353 K (80 °C) para el molde, enfriarse y volver a calentarse sin degradación significativa, esta característica les permite ser moldeados fácilmente por inyección y debido a que es un material termoplástico, puede ser fácilmente reciclado, esto significa que una forma común de

producir plástico ABS es de otro plástico ABS (11), en la figura 2 se muestra una clasificación general de los termoplásticos de aplicación industrial: avanzados, ingenieril y domésticos.



**Fig.2** Termoplásticos de aplicación industrial

### 2.2.1 Termoplásticos Avanzados

La sofisticación tecnológica permite llevar a cabo procesos de síntesis con nuevas combinaciones, en los que se realiza un mayor control sobre la estructura del polímero, de manera que se consiguen materiales mejorados o novedosos, con alto rendimiento y aplicaciones.

Los plásticos de alto rendimiento suelen tener una temperatura de servicio continuado superior a 423 K (150 °C). Esta categoría de materiales, véase figura 3, es la que ofrece las mejores propiedades de los polímeros, como características tribológicas, ahorro de peso y resistencia química, sobre todo a altas temperaturas de servicio continuo. Utilizando materiales de refuerzo especiales, como fibra de vidrio, cuentas de vidrio o fibra de carbono, se puede aumentar aún más la resistencia a la distorsión térmica y la rigidez.



**Fig.3** Termoplásticos Avanzados

Algunas de las principales áreas de aplicación de los termoplásticos avanzados son:

- Aplicaciones que requieren resistencia a la abrasión, desgaste o un bajo coeficiente de fricción.
- Aplicaciones resistentes al calor y a los golpes para las industrias del vidrio y aeroespacial.

- Materiales resistentes al calor, a prueba de emisiones, muy aislantes o con una conductividad determinada para la industria de semiconductores e ingeniería eléctrica
- Componentes para dispositivos médicos resistentes a procesos de esterilización e hidrólisis
- Componentes a prueba de emisiones y resistentes a la radiación para tecnologías de vacío y aplicaciones en el campo de la tecnología de rayos X y energía nuclear
- Componentes para la industria química

### **2.2.2 Termoplásticos de Ingeniería**

Los plásticos de ingenieriles ofrecen infinidad de ventajas y, en muchos casos, incluso pueden ser un sustituto eficaz de metales y cerámicas. Además, cuando se trata de aplicaciones técnicas poco habituales, a veces la única alternativa viable son los componentes de plásticos de ingeniería, lo que los convierte en un verdadero motor para la innovación en todos los sectores industriales.

Trabajan con valores altos de resistencia mecánica o térmica comparada con la de los plásticos básicos comúnmente utilizados para envases, como PE, PP o PVC, se opta por emplear plásticos de ingeniería, algo menos sofisticados y costosos que los plásticos para altas temperaturas.

Los plásticos de ingeniería se pueden utilizar de forma continua a temperaturas de entre 373 K (100 °C) y 423 K (150 °C). En general, este grupo de productos se denomina también termoplásticos técnicos. Los plásticos de ingeniería ofrecen:

- Buenas características mecánicas
- Excelente maquinabilidad y estabilidad dimensional
- Buena resistencia química
- Buena resistencia al desgaste

### **2.2.3 Termoplásticos domésticos**

Este tipo de termoplásticos se utiliza principalmente en la producción de botellas para bebida, alfombras, cuerdas, envases de leche, botellas de detergente, botellas de

champú,, bolsas de supermercado, los tipos principales son el PET, HDPE (polietileno de alta densidad), LDPE (polietileno de baja densidad), PP (polipropileno), PS (poliestireno).

La tabla 3 muestra las posibles clasificaciones, estas son utilizadas para determinar el método para crearlos, o por sus características de aplicación (15).

**Tabla 3.** Clasificación de los plásticos (16).

Clasificación		
Comportamiento con la temperatura	Termoplásticos	
	Termoestables o termofijos	
Unidad básica estructural	Homopolímeros	
	Copolímeros	Aleatorios
		Bloque
		Injertados
	Alternados	
Forma de la cadena	Molécula simple	
	Lineales	
	Ramificados	
	Molécula entrecruzada	
Mecanismo de reacción de polimerización	Polimerización en cadena	
	Polimerización en etapas	
Aplicación	Elastómeros	
	Plásticos	
	Fibras	
	Recubrimientos	
	Adhesivos	
Origen	Natural	
	Sintéticos	
	Semisintético	
Ordenamiento molecular	Amorfo	
	Cristalino	
Composición química	Orgánicos	
	Polímeros	Poliolefinas
		vinílicos
	Polímeros	

El termoplástico *Lustran ABS Elite HH 1827*, es un compuesto de tres diferentes termoplásticos: Polibutadieno, Estireno y Acrilonitrilo, los cuales al ser aleados producen un termoplástico de ingeniería de alto desempeño.

Para verificar que las piezas producidas cuentan con la calidad requerida es necesario medir y comparar los resultados de acuerdo a la especificación dimensional y

tolerancias que indica el dibujo de referencia del producto o ensamble, sin embargo, no es la única característica que debe cumplir, ya que el proceso de inyección por moldeo puede estar variando y en ocasiones las piezas plásticas pueden salir con falta de material, presentar una deformación, exceso de rebabas, rechupes, líneas de fusión, estrías en la superficie, efecto jetting, alabeo, laminación, poros y burbujas, manchas negras, marcas de expulsores o simplemente no cumplir con la calidad visual necesaria. Por esta razón, es necesario validar que los parámetros de inyección están controlados para poder reducir la probabilidad de piezas defectuosas (17).

### **2.3 INYECCIÓN Y MOLDEO DE PLÁSTICO**

Existen varios procesos de fabricación con plástico, pero podríamos separarlos en dos grupos, moldeo a baja presión y a alta presión. Los procesos de baja presión se llevan a cabo para obtener piezas de volumen relativamente grande y pequeño espesor, por ejemplo el proceso de insuflado de aire comprimido para fabricar botellas de plástico. Con respecto a la alta presión podemos diferenciar en extrusión para la obtención de producto de manera continua, la inyección indicada para grandes series de piezas y la compresión que únicamente se utiliza para ciertos materiales como la baquelita.

En ingeniería, el moldeo por inyección es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido (o ahulado) en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado boquilla. En ese molde el material se solidifica, comenzando a cristalizar en polímeros semicristalinos. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

El moldeo por inyección es una técnica muy popular para la fabricación de artículos muy diferentes. La popularidad de este método se explica con la versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, el diseño escalable desde procesos de prototipos rápidos, altos niveles de producción y bajos costos, alta o baja automatización según el costo de la pieza, geometrías muy complicadas que serían imposibles por otras técnicas, las piezas moldeadas requieren muy poco o nulo acabado pues son terminadas con la rugosidad de superficie deseada, color y transparencia (18) (19).

El proceso de moldeo por inyección es la técnica más popular para fabricar piezas plásticas. Esto se debe a la enorme variedad de formas en las que se puede moldear este material, es un proceso rápido y eficiente. Una de las ventajas más importantes es que las piezas moldeadas requieren muy poco trabajo de acabado, pues este proceso permite fabricar una infinidad de artículos de una sola pieza, con texturas, colores y otras variables definidas directamente desde la inyección en el molde (20).

Después de realizar el diseño de un producto de plástico, un fabricante de moldes elabora los moldes de inyección. Estos pasan por un mecanismo de precisión para crear las características de la pieza que se desea producir.

Posteriormente pasa al proceso de inyección, que se realiza en una máquina de inyección de plástico, donde el polímero se funde por calor, y se inyecta a las cavidades huecas de un molde dando forma así a la pieza a fabricar.

El proceso de obtención de una pieza por inyección de plástico es el siguiente:

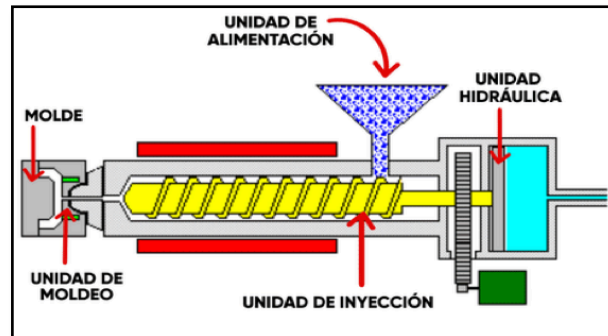
- Cierre del molde
- Inyección: fase de llenado y de mantenimiento
- Plastificación y enfriamiento
- Apertura del molde y expulsión de la pieza

Sin embargo, ¿qué ocurre si no hubo la precisión suficiente en el diseño?, ¿Cómo probar si el molde funcionará antes de manufacturar?, es bien sabido que la producción de un molde no es sencilla y en muchas ocasiones es realmente costosa, es por esto que se busca hacer pruebas y simulaciones antes de manufacturar una pieza de estas.

### **2.3.1 Principios básicos del moldeo**

El principio de moldeo es muy sencillo, en una máquina se funde material plástico, el cual se inyecta en un molde que le da la forma deseada. Esto parece sencillo, pero es un proceso que requiere una perfecta sincronización de tiempos y movimientos. Los moldes cuentan con dos partes que al ser unidas forman una cavidad. Durante el proceso, potentes resistencias funden el plástico que posteriormente es inyectado en

este espacio dentro del molde, creando una pieza que se solidifica y es expulsada de forma automática (20), de manera gráfica la figura 4 muestra la descripción realizada.



**Fig. 4** Elementos del proceso de inyección (20).

Descripción del proceso de inyección de plástico.

- 1. Unidad de alimentación.** El proceso inicia en una tolva que se llena con gránulos de plástico a través de un dosificador. Esta es la materia prima de cualquier producto, la cual es alimentada dentro del barril que conduce el polímero a través de la unidad de inyección.
- 2. Unidad hidráulica.** Para que el material fundido avance a través del barril de la unidad inyectora, el husillo es impulsado por un sistema hidráulico habilitado por un motor eléctrico, que provoca un movimiento axial del barril y sus aspás en un flujo sin fin.
- 3. Unidad de inyección.** El polímero es fundido con el calor generado por diversas bandas de resistencias que están colocadas alrededor del barril. El fluido es inyectado dentro del molde a través de la boquilla, ejerciendo la presión suficiente para que se llene y se solidifique dentro del molde.
- 4. Unidad de moldeo.** Consiste en una prensa hidráulica o mecánica integrada por dos placas portamolde, las cuales provocan la unión hermética de ambas partes del molde para formar la cavidad de la pieza y resisten la fuerte presión que se aplica cuando el polímero es inyectado en el molde.

Una de las dos partes del molde se mantiene fija, que es la que está pegada a la unidad de inyección del plástico, mientras la otra que se mantiene en movimiento durante el ciclo de moldeo y es conocida como la parte extractora o de cierre.

Esta misma unidad se abre nuevamente cuando la pieza inyectada se solidifica, al ser enfriada con la ayuda de un fluido refrigerante y finalmente ser expulsada por los pernos botadores del lado extractor, para iniciar nuevamente el ciclo, el cual se lleva a cabo de forma continua.

- 5. Molde.** El molde es la parte más importante de la máquina de inyección, pues es donde la pieza de plástico tomará su forma y acabado. Es una pieza intercambiable que se atornilla en la prensa a través de un portamolde. Consta de dos partes iguales que se unen herméticamente.

Cada una de las partes tiene una cavidad que se llenará con el fluido del polímero caliente, para tomar la forma y replicar la pieza correspondiente. El material es presionado por la unidad inyectora para llenar la cavidad del molde al 100% antes de enfriarse.

### **2.3.2 Los beneficios del moldeo por inyección de plástico**

Además de producir un volumen importante de piezas de plástico de alta calidad, hay muchos otros beneficios del moldeo por inyección. Al menos los que mencionamos son para dar una idea o confirmación de las múltiples razones que hay para implementar este método (10).

- 1. Puedes hacer conversiones complejas de metal a plástico.** El moldeo por inyección brinda la oportunidad de realizar conversiones complejas de metal a plástico.
- 2. Componentes plásticos más ligeros.** Los componentes de plástico para cualquier producto son más ligeros que las piezas de metal maquinadas.
- 3. Te olvidas del problema de corrosión.** Gracias a que el material usado es plástico y no metal, la corrosión deja de ser un problema en el proceso de moldeo por inyección.
- 4. Amplia libertad de diseño de partes.** Los moldes de inyección de plástico ofrecen gran libertad de diseño de partes. Permiten añadir radios o bordes redondeados que requerirían maquinado y costo adicional en piezas de metal.
- 5. Creación de piezas detalladas y con geometría compleja.** Ya que el material plástico es empujado hacia el molde con gran presión, la cavidad se llena completamente.



Esto da como resultado que el plástico se amolde incluso a las formas más difíciles, intrincadas y detalladas del molde.

6. **Se pueden combinar diferentes materiales en una sola pieza.** El moldeo por inyección permite incorporar componentes no-plásticos, por ejemplo, un tornillo de metal dentro de una perilla de plástico.
7. **Alto grado de automatización.** Este proceso involucra un elevado grado de automatización, lo cual representa un ahorro importante en costos y tiempos de producción. Además, muchos pasos del proceso los pueden realizar máquinas o robots controlados por un solo operador.
8. Escasos o nulos desechos materiales. **Todo este proceso genera poco o nula cantidad de desechos materiales, ya que los restos del plástico sobrante pueden ser reutilizados.**

### **2.3.3 Materiales utilizados para fabricar moldes**

Actualmente en la fabricación de moldes de inyección de plástico se utilizan principalmente aceros que son considerados típicos en la industria del plástico. Los materiales utilizados en la fabricación de moldes de inyección de plástico deben cubrir ciertas características mínimas para lograr la calidad y durabilidad del molde, no todos los materiales cubren estos requisitos. A continuación, se enlistan algunos de los aceros recomendados por la sociedad de ingeniería y manufactura de Estados Unidos (SME) para la fabricación de moldes dedicados a la inyección de plásticos y que son utilizados por los proveedores de inyección en la república mexicana (15) (7).

**Aleación de acero 4130**, es una aleación de acero de alta resistencia utilizado principalmente en la fabricación de moldes para la cavidad y placas base retenedor, placas de soporte y placas de sujeción y se suministra en durezas de 26 a 35 HRC.

**Acero grado herramienta S-7**, es a prueba de golpes con buena resistencia al desgaste, este acero se utiliza para enclavamientos y pestillos; es endurecido entre 55 y 58 HRC.

**Acero grado herramienta O-1**, este es un acero de propósito general, utilizado para pequeños insertos y núcleos con un endurecido de 56 a 62 HRC.

**Acero grado herramienta A-2**, este acero tiene buena estabilidad dimensional y

resistencia a la abrasión y se utiliza para fabricar deslizaderas y pernos, se endurece entre un rango de 55 y 58 HRC.

**Acero grado herramienta D2**, este acero tiene alto contenido de cromo y de carbono; es difícil de moler, pero tiene excelente resistencia a la abrasión. Se utiliza para la fabricación de porta insertos, elevadores y deslizaderas, se endurece entre 58 y 60 HRC.

**Acero grado herramienta H-13**, es un acero de muy alta dureza, utilizado para los requerimientos de cavidades y núcleos de alta calidad. Principalmente usado para expulsores, extractores de colada, pernos guía y pasadores de ángulo. Se suministra en su versión recocida en un rango de 15 a 20 HRC, pero puede ser endurecido a 60 HRC con poca distorsión mediante temple.

#### **2.3.4 Las partes del molde son:**

1. Canales: Son los conductos por donde pasa el plástico fundido hacia la cavidad debido a la presión aplicada por la unidad de inyección.
2. Cavidad: Es el espacio donde el plástico inyectado toma la forma de la pieza.
3. Respiradores: Son conductos por los cuales sale al aire de la cavidad, conforme entra el fluido de plástico fundido.
4. Sistema de enfriamiento: Son los conductos por donde circula el refrigerante para regular la temperatura del molde. El enfriamiento es un factor crucial, pues de esto depende que la pieza no tenga deformaciones o que la superficie final sea la esperada.
5. Pernos botadores: Al abrir el molde, estos pernos ubicados en expulsan la pieza moldeada fuera de la cavidad.

#### **2.3.5 Parámetros básicos en el proceso de inyección**

Hay una gran variedad de parámetros que afectan el proceso de inyección de termoplásticos, los principales son: temperatura, presión, tiempo y distancia.

**Temperatura.** Debe tomarse en cuenta la temperatura del tornillo que se utiliza para plastificar el material y también la temperatura del molde; para regularlas, usualmente hay dos tipos de controles, uno en la máquina de inyección, que se encarga de controlar la temperatura del tornillo y del barril para asegurar que se realice la plastificación y el

otro, que se encarga de regular la temperatura del molde.

**Presión.** Usualmente, los parámetros de presión son controlados por la máquina, que monitorea la velocidad a la que gira el tornillo y la activación o desactivación del pistón de inyección o de un motor, según sea el caso. Otra presión importante que se controla es la fuerza con la que se cierra el molde.

**Tiempo.** Es muy importante controlar el tiempo en que permanece cerrado el molde y lograr que sea suficiente para permitir la solidificación de la pieza inyectada y que al abrirlo, esta no se deforme.

**Distancia.** Para controlar el intervalo que recorre el pistón de inyección actualmente se utilizan sistemas de retroalimentación como encoders, que miden electrónicamente el desplazamiento del sistema de pistón.

En el proceso de inyección de plástico se presentan diferentes problemas de calidad que pueden estar relacionados a defectos en el material o a los parámetros de inyección. Dentro de los problemas más comunes se encuentra mancha plateada, rebabas (flash) y falta de material (short shots), éstos están relacionados al llenado de la pieza, los rechupes o huecos en la pieza plástica están relacionados a problemas de compactación en la inyección o por un enfriamiento deficiente en el producto (10).

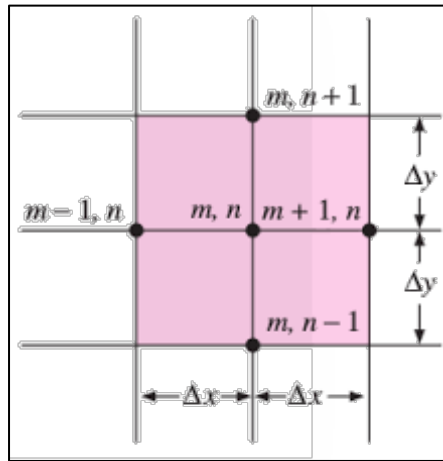
Existen diferentes factores que afectan la calidad de las partes moldeadas y estos pueden clasificarse en cuatro categorías (10):

- El diseño de la parte plástica.
- El diseño del molde.
- El desempeño de la maquinaria.
- Las condiciones del proceso.

## 2.4 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Los métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales se basan en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales por ecuaciones algebraicas. En el caso del popular método de diferencias finitas, esto se realiza al reemplazar las derivadas por diferencias.

Considérese un cuerpo bidimensional que se divide en incrementos iguales en ambas direcciones  $x$  e  $y$ , como se muestra en la Figura 5. Los puntos nodales se designan como se muestra, las posiciones  $m$  indicando el incremento en  $x$  y las posiciones  $n$  indicando el incremento en  $y$ . Se desea determinar la temperatura de cualquiera de estos puntos nodales dentro del cuerpo, utilizando la ecuación (1) como ecuación de gobierno. Las diferencias finitas se utilizan para aproximar incrementos diferenciales en la temperatura y en las coordenadas espaciales; cuanto más pequeños se elijan los incrementos, más se aproximará la distribución de temperaturas real (9).



**Fig. 5** Nomenclatura en diferencias finitas

Suponiendo que la conductividad térmica es constante, la ecuación de Laplace aplica para estados transitorios sin generación de calor.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

Los gradientes de temperatura pueden escribirse como sigue

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2, n} \approx \frac{T_{m+1, n} - T_{m, n}}{\Delta x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1/2, n} \approx \frac{T_{m, n} - T_{m-1, n}}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m, n+1/2} \approx \frac{T_{m, n+1} - T_{m, n}}{\Delta y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m,n-1/2} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \quad (5)$$

La segunda derivada de los gradientes de temperatura para x e y:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+\frac{1}{2},n} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta x} = \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n+\frac{1}{2}} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} = \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (7)$$

Por tanto, la aproximación en diferencias finitas de la ecuación de Laplace resulta

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} = 0 \quad (8)$$

Finalmente, para los casos en los que  $\Delta x = \Delta y$

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} = 0 \quad (9)$$

Se está considerando el caso de conductividad térmica constante, los flujos de calor pueden expresarse totalmente en términos de diferencias de temperatura. La ecuación 9 establece de forma sencilla que el flujo neto en un nodo es cero en condiciones estacionarias. En efecto, la aproximación numérica en diferencias finitas sustituye la distribución continua de temperaturas por barras ficticias conductoras del calor que conectan pequeños puntos nodales que no generan calor.

Se puede considerar un esquema de diferencias finitas para tener en cuenta la generación de calor. Simplemente se añade el término en la ecuación general, obteniendo.

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} + \frac{q}{k} = 0 \quad (10)$$

Para una malla cuadrada

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + \frac{q(\Delta x)^2}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (11)$$

Para aplicar el método numérico, debe escribirse la ecuación 9 para cada nodo dentro del material y resolver el sistema de ecuaciones resultante para las temperaturas de los nodos.

En método numérico es simplemente un medio de aproximar una distribución continua de temperaturas mediante elementos finitos. Cuantos más nodos se tomen, mejor será la aproximación; pero, por supuesto, más ecuaciones suponen soluciones más engorrosas. En problemas prácticos no es necesario utilizar un gran número de nodos debido a la incertidumbre en las condiciones de contorno. Sin embargo para casos que se requiera mayor precisión en las respuestas de salida de las temperaturas, velocidades, deformaciones, presión se deberá trabajar con mayor número de elementos, nodos y por consecuencia con mallas más finas.

Las ecuaciones de los nodos pueden escribirse como:

$$\begin{array}{rcl} a_{11}T_1 + & a_{12}T_2 + \cdots & a_{1n}T_n = C_1 \\ a_{21}T_1 + & a_{22}T_2 + \cdots & a_{2n}T_n = C_2 \\ a_{31}T_1 + \cdots & & a_{3n}T_n = C_3 \end{array}$$

donde  $T_1, T_2, \dots, T_n$  son las temperaturas desconocidas de los nodos.

Claramente, cuanto mayor sea el número de nodos, más compleja será y más tiempo requerirá la solución, incluso con un ordenador de alta velocidad. Para la mayor parte de los problemas de conducción, la matriz contiene un gran número de elementos nulos de modo que puede permitirse alguna simplificación en el procedimiento. Por esta razón los métodos iterativos de solución pueden resultar muy eficientes. El método de iteración de Gauss-Seidel es probablemente el más utilizado para la resolución de estas ecuaciones en problemas de transferencia de calor (9).

Otros métodos de solución incluyen un análisis transitorio llevado a cabo hasta el régimen estacionario, eliminación directa (eliminación de Gauss), o técnicas iterativas más sofisticadas. Para la resolución de problemas de transferencia de calor se encuentran disponibles programas de ordenador en régimen estacionario y transitorio que permiten manejar hasta 30 000 nodos (21).

La solución numérica de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDPs) requiere de la discretización de las ecuaciones para reemplazar las ecuaciones diferenciales continuas con un sistema simultáneo de ecuaciones algebraicas discretas. Se han desarrollado diferentes técnicas para la construcción del proceso de solución, las tres técnicas básicas para resolver estos sistemas de ecuaciones son: Diferencias Finitas, Elemento Finito y Volumen Finito. En el caso de la técnica de Diferencias Finitas, las derivadas en las EDPs se representan en los puntos de malla por expresiones algebraicas finitas que se obtienen con la serie de Taylor, donde, generalmente la serie es truncada en los términos lineales despreciando los términos de orden cuadrático y superior. Si la solución varía fuertemente entre los puntos de malla se pueden obtener resultados no congruentes. Un remedio para ello, es usar más puntos de malla y con ello las distancias entre los puntos serán reducidas. Sin embargo, esto puede ser costoso desde el punto de vista computacional, ya que la solución requerirá un mayor número de ecuaciones algebraicas. La otra posibilidad de discretización es retornar las EDPs a su forma fundamental integral y entonces representar las integrales sobre celdas discretas. Bajo esta situación se tienen dos alternativas, una es si representará la solución de las variables sobre celdas en términos de funciones seleccionadas y entonces integrar las funciones analíticamente sobre el volumen (técnica de Elementos Finitos) o balancear los "fluxes" a través de las caras de la celda (técnica de Volumen Finito) (2).

La técnica de diferencias finitas es computacionalmente simple cuando se usa para la solución de problemas que involucran geometrías regulares con puntos distribuidos uniformes sobre la región de análisis. Sin embargo, con esta técnica es difícil sobrellevar la solución numérica de problemas con geometrías irregulares y/o complejas.

La técnica de elemento finito se utiliza para analizar geometrías complicadas, en esta técnica el dominio sometido a análisis se cubre con elementos triangulares o con una distribución aleatoria de puntos. Ninguna de estas dos colecciones de puntos es recomendable para soluciones eficientes en diferencias finitas y volumen finito, ya que es difícil el proceso de identificación de nodos vecinos en un punto y, las matrices resultantes carecen de una estructura agrupada, es decir, las matrices resultantes son dispersas (22).

## 2.5 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO(MEF)

El método de elemento finito (MEF) basa su operación en la capacidad de dividir un continuo en un número finito de elementos para posteriormente resolver un sistema de funciones continuas, considerando las interacciones que pudieran ocurrir entre ellos, la secuencia de pasos para la solución de un problema por medio de elemento finito es (23).

- Dominio: espacio geométrico donde se va analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, temperatura, desplazamientos, voltaje, focos de calor.
- Desarrollar el sistema de ecuaciones
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas.

El método de diferencias finitas como formulación matemática es relativamente nueva; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha experimentado un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con diferencias finitas.

Pero no hay que llevarse a engaño, el manejo correcto de este tipo de programas exige un profundo conocimiento no solo del material y el proceso con el que se trabaja, sino también de los principios del método. Sólo en este caso estaremos en condiciones de garantizar que los resultados obtenidos en los análisis se ajustan a la realidad.

El método de diferencias finitas es una técnica estándar, que por la sencillez de su configuración y la rapidez de sus resultados se ha ganado un lugar especial en el conjunto de las técnicas utilizadas para realizar la determinación de las propiedades térmicas de las sustancias. La técnica de diferencias finitas es hasta hoy bastante utilizada a la hora de la integración numérica en el tiempo y además que considera diferencia finita por la derecha, izquierda y centrada. Una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para la obtención de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales



es la de diferencias finitas por la razón que nos atañe en el cálculo de un sólido (moldes de inyección de plástico) (4).

Es claro que, para resolver numéricamente problemas con geometrías irregulares o complejas en las áreas de Transferencia de Calor y Dinámica de Fluidos se requiere primero generar el dominio computacional del sistema físico irregular. Por lo tanto, en este trabajo es de interés particular el desarrollo de un código de cómputo que genere las mallas computacionales de sistemas complejos a partir de la solución de ecuaciones diferenciales parciales, para aplicarlo posteriormente en la solución de problemas de dinámica de fluidos computacionales y transferencia de calor con geometrías irregulares o complejas.

## CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

Se debe producir una pieza plástica hecha con material termoplástico Lustran ABS Elite HH 1827 analizándolo como un fluido no Newtoniano con fijaciones de ajuste rápido, utilizando un canal caliente en el proceso. Utilizaremos un análisis de simulación convencional basado en Ansys Fluent, el cual es un programa de análisis de fluidos para una gama de aplicaciones en el modelado y simulación de flujos que incluye turbulencia, reacciones o efectos térmicos y simulación CFD (Computational Fluids Dynamics) de propósito general, usadas para problemas de fluidos, tiene herramientas de modelado, mallado y simulación en una interface moderna que da cabida a una amplia gama de resolución de problemas. Ansys Fluent se integra con la plataforma Ansys Workbench de forma bi direccional para compartir información de modelado y mallas. Por ejemplo un escenario de flujo puede ser usado como fronteras en un problema de diseño estructural.

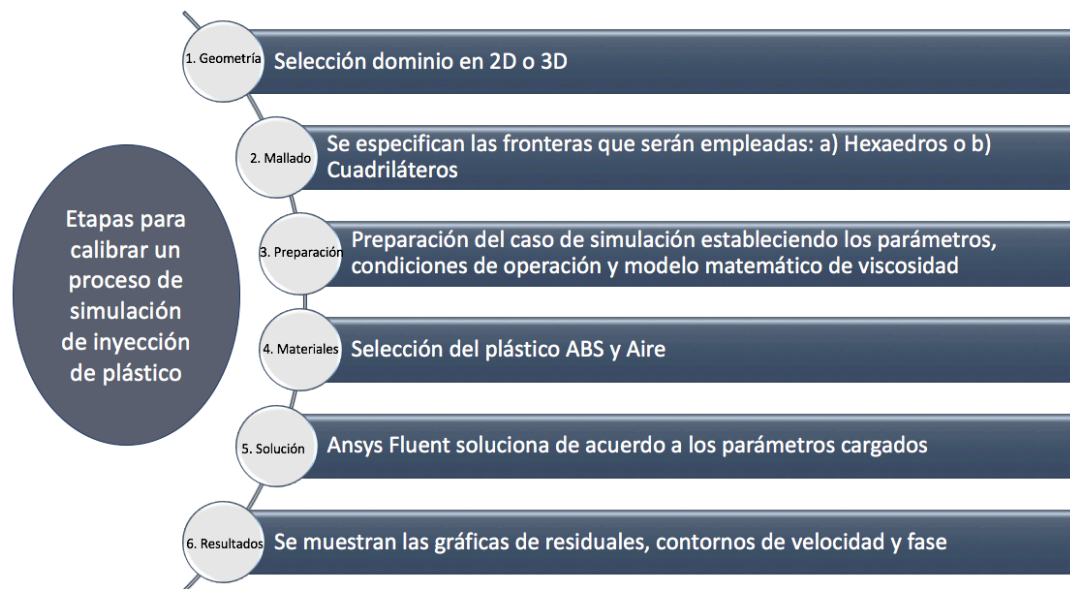
El canal y la pieza serán simulados, suponiendo un estado transitorio y con un flujo no Newtoniano. El análisis del proceso de inyección de plástico y sus fases tiene en la actualidad un conjunto de herramientas disponible que permiten determinar las condiciones idóneas para el procesado de materiales plásticos. Una de las técnicas de procesado de plásticos que más se utiliza es el moldeo por inyección, siendo uno de los procesos más comunes para la obtención de productos plásticos. Hoy en día cada casa, cada vehículo, cada oficina, cada fábrica, etc. contiene una gran cantidad de diferentes artículos que han sido fabricados por moldeo por inyección (24).

En el presente trabajo se utiliza una malla del tipo transitorio, la cuál permite manejar hasta 30,000 elementos, resultando una alta precisión de sus parámetros de acuerdo con su secuencia de solución.

Varios problemas térmicos no son susceptibles de una solución analítica ya que son representados por ecuaciones algebraicas y diferencias complejas, por ejemplo, en el caso de las diferencias finitas estas se resuelven reemplazando las derivadas por diferencias (6).

Como el análisis térmico describe con precisión las condiciones de frontera responsables de las tensiones térmicas inducidas en las piezas, es posible reproducir la deformación

de la pieza. Con el fin de precisar el concepto de fluido que se utilizará, es importante destacar que, al definir los fluidos newtonianos generalizados, estos involucran tanto los que son de viscosidad constante (newtonianos), como aquellos cuya viscosidad depende de la tasa de cizalladura (no newtonianos) (2). En la figura 6 se muestra de manera gráfica las etapas del proceso de calibración.



**Figura 6.** Etapas del proceso de calibración

### 3.1 MÉTODO

Un diseño basado en simulación numérica ha demostrado ser una buena alternativa que permite reducir costos generados por un mal diseño, mala elección del material o variables de operación mal consideradas. Las técnicas de prueba y error ya no están siendo utilizados debido a los altos costos y el tiempo excesivo requerido.

#### 3.1.1 Calibración de una simulación para inyección de plástico ABS

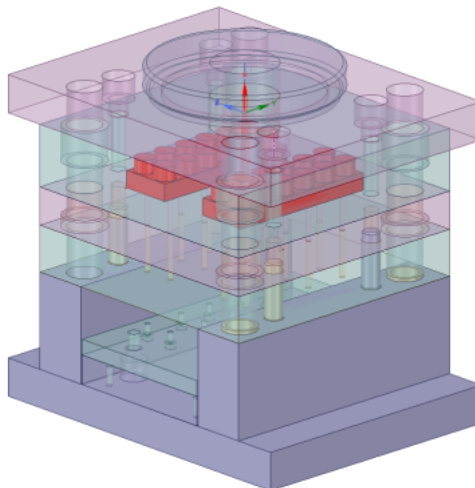
Calibrar un caso de simulación es una práctica común que reduce significativamente la incertidumbre sobre la convergencia de un caso.

El proceso de simulación numérica requiere normalmente una etapa preliminar llamada “calibración”, que permite al analista determinar los parámetros apropiados que garanticen la convergencia de la solución, algunos de estos parámetros son:

1. **Geometría:** Determinar algún tipo de simplificación geométrica: 2D, 3D, planos de simetría, periodicidades, etc.
2. **Malla:** Determinar el tipo y calidad de elementos para discretizar el dominio.
3. **Régimen de la solución:** Elección del régimen estacionario o transitorio según el requerimiento.
4. **Modelos:** Elección de modelos matemáticos que gobiernen el fenómeno en cuestión.
5. **Materiales:** Elección del material con sus propiedades (constantes o dependientes).
6. **Variables de monitoreo** (Temperatura, presión, viscosidad, fases, turbulencias, etc.).

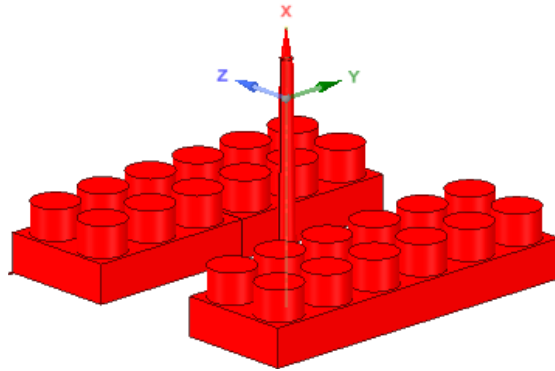
### 3.1.2 Metodología para calibrar parámetros de simulación

La figura 7 muestra el ensamble del molde, en función de la ubicación y orientación de la cavidad (dominio del fluido) se determinan las simplificaciones geométricas mencionadas.



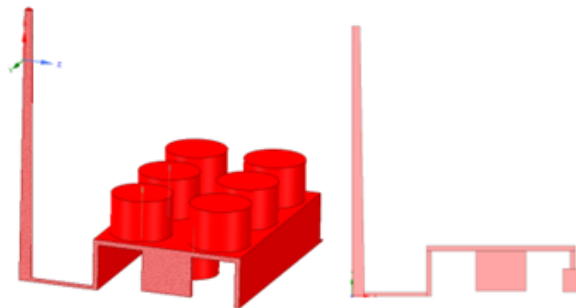
**Figura 7.** Molde de inyección de pieza de análisis.

Como se muestra en la figura 8 para análisis de inyección de plástico ABS, la cavidad de la pieza debe convertirse en un sólido que posteriormente se discretizará para generar la malla.



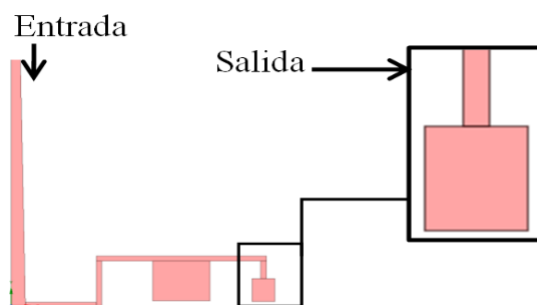
**Figura 8.** Dominio 3D de la pieza de análisis CFD.

Como se trata de un proceso de calibración se puede simplificar el dominio de fluido. Como se observa en la figura 8 la geometría es simétrica y puede emplearse para generarse el dominio en 2D.



**Figura 9.** Dominio 2D de la pieza de análisis.

En términos generales el dominio en 2D se usa con las condiciones de operación mostradas en la figura 10.

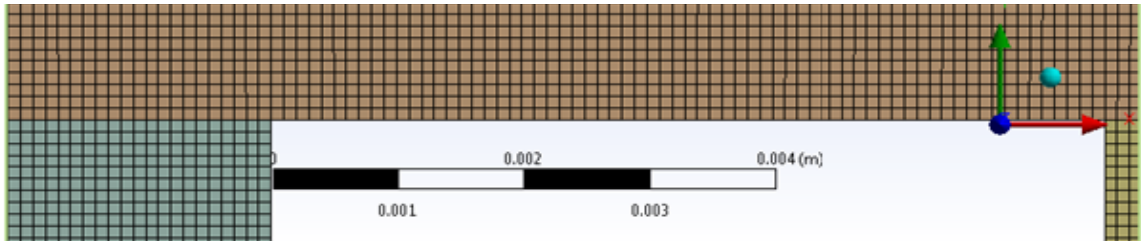


**Figura 10.** Condiciones de frontera del dominio 2D.

Los bordes del dominio son descritos como una condición de pared adiabática y sin rugosidad específica.

### 3.1.3 Mallado

Para el estudio es necesario dividir la figura 9 en una geometría regular que ayude al software a crear el mallado. En la figura 11 se observa el dominio 2D mallado con cuadriláteros y algunos detalles de la división del dominio.



**Figura 11.** Hexaedros como elementos de mallado.

La figura 11 muestra la discretización del dominio resultó en 25 000 elementos con una calidad mínima de 1 en la escala de ortogonalidad, donde el valor de 1 es el máximo valor de calidad y 0.15 como el mínimo requerido.

Típicamente en la etapa de mallado se especifican las fronteras que serán empleadas para parametrizar un caso de simulación; en este caso, y como se indicó en la etapa de simplificación geométrica, solo tendremos una entrada y una salida que para fines de compatibilidad con el solucionador. El resto de las fronteras las establecemos como pared.

### 3.1.4 Preparación de la simulación

Para realizar la simulación se utilizaron las siguientes propiedades para el fluido de inyección:

- **Fluido adiabático** debido a que se pretende calibrar la dependencia de la viscosidad en función del esfuerzo al corte. Se consideran 2 fluidos segregados (aire y plástico ABS).
- **Viscosidad laminar** debido a la naturaleza viscosa de un fluido no newtoniano
- **Densidad** de  $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$

### 3.2 MODELOS DE VISCOSIDAD

El modelo de Carreau (ecuación 12 y 13) representa un fluido que a baja velocidad de deformación sigue la Ley de Newton de la viscosidad, y a alta velocidad de deformación obedece la ley de la potencia.

$$\tau_{yx} = \left\{ \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \right\} \dot{\gamma} \quad (12)$$

$$\eta = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (13)$$

Donde  $\mu_0$  es la viscosidad a baja velocidad,  $\mu_{\infty}$  es la viscosidad a alta velocidad,  $\lambda$  tiempo de relajación y  $n$  índice de comportamiento de la viscosidad

Modelo de viscosidad de Cross. La ecuación de la forma (ecuación 13):

$$\frac{\mu_0 - \mu_s}{\mu_s - \mu_{\infty}} = [C_c \dot{\gamma}]^h \quad (14)$$

Donde;  $\mu_s$  es la viscosidad,  $C_c$  es una constante con unidades de tiempo y  $h$  una constante adimensional. Se puede observar que la ecuación asume que se debe conocer los valores de la viscosidad a baja y alta cizalladura  $\mu_0$  y  $\mu_{\infty}$  además de los parámetros  $C_c$  y  $h$ .

El modelo matemático de Cross/Carreau (ecuación 12) describe un comportamiento logarítmico que indica el descenso de la viscosidad ( $\mu$ ) cuando la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) aumenta y (ecuación 14) es gobernado por 3 parámetros que permanecerán constantes para un determinado tipo de polímero:

$$\mu = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda * \dot{\gamma})^m} \quad (15)$$

donde:

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (Pa.s).

$\eta_0$  = viscosidad a un valor de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) de cero.

$\lambda$  = tiempo natural (inverso de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) donde el fluido cambia de newtoniano a no newtoniano).

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte del fluido

$m = \text{índice de potencia} = n - 1.$

$n = \text{índice de la ley de potencia donde tenemos los siguientes casos:}$

$n < 1$  fluido pseudoplastico

$n = 1$  fluido newtoniano

$n > 1$  fluido dilatante

Los parámetros  $\eta_0$ ,  $\lambda$  y  $m$  en este trabajo son obtenidos con la herramienta de simulación PolyMat a través de un ajuste de curvas para fluidos no newtonianos. La tabla 4 muestra los datos experimentales utilizados para el polímero ABS.

**Tabla 4.** Datos experimentales de polímero ABS.

Tasa de corte (1/s)	Viscosidad (Pa.s)
10000	15
2000	70
500	210
100	500

Los parámetros constantes encontrados para la Ley de Cross son:

$$\eta_0 = f_{ac} = 0.8298314 \text{ E}+03 \text{ kg/m-s}$$

$$\lambda = t_{nat} = 0.1421445 \text{ E}-01 \text{ s}$$

$$m = \text{expom} = 0.7222778 \text{ E}+00$$

Considerando que  $m = \text{expom} = \text{índice de potencia} = n - 1$ , entonces  $n = 0.277777$

### 3.3 VENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO CROSS/CARREAU

Representa un fluido que a baja velocidad de deformación sigue la Ley de Newton de la viscosidad, y a alta velocidad de deformación obedece la Ley de la potencia que tiene una limitada capacidad de predicción de la viscosidad en las cercanías de las regiones newtonianas a baja y alta tasa de cizalladura. La estructura de la ecuación (13) asume que se debe conocer los valores de las viscosidades newtonianas a baja y alta tasa de cizalladura, además de los parámetros  $C_c$  y  $h$ , los cuales deben ser determinados experimentalmente.



### 3.4 DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO CROSS/CARREAU

Este modelo asume que la viscosidad varía siendo un fluido no newtoniano. Se tiene que obtener valores experimentales de  $\mu_{\infty}$ ,  $\mu_0$ ,  $\lambda$  y  $n$ . El método de diferencias finitas implica inherentemente la existencia de cifras residuales en cada iteración, las cuales pueden comportarse de diferente manera; aumentar o reducir de forma drástica o atenuada, todo depende del fenómeno simulado. En este caso los cambios entre iteraciones fueron drásticos debido a la variación de la densidad respecto a la velocidad de corte y de los cambios geométricos súbitos.

La tabla 5 muestra los valores de relajación numérica ajustados para lograr que el caso convergiera en cada iteración y paso de tiempo (debido a que es un caso transitorio).

**Tabla 5.** Controles para el caso multifásico.

Factores	Valor
Presión (Pa)	0.2
Densidad	0.5
Fuerzas sobre el cuerpo	0.5
Momento	0.3
Volumen fraccional	0.5

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

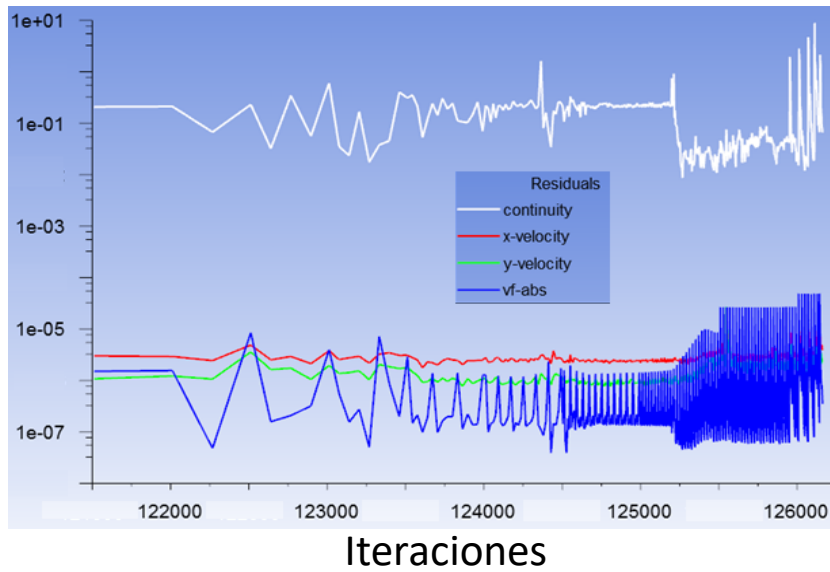
A continuación, se describen las etapas por las que pasa el material desde que abandona la cámara de plastificación hasta que se extrae la pieza del molde, y del efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada tomando en cuenta las variables que rigen el comportamiento del material dentro del molde (temperatura, presión y tiempo).

Recordemos que el propósito de la simulación es calibrar los parámetros numéricos y del material en un análisis térmico de operaciones de moldeo. Estas actividades son un requisito preliminar para poder realizar una simulación completa del molde (adiabático o no). Los primeros intentos de simulación presentaron divergencias significativas, debido a que la primera fase (plástico ABS) presenta viscosidades grandes en comparación con la segunda fase (aire) y los gradientes de velocidad varían significativamente debido a los cambios geométricos.

Con el ajuste de los métodos de solución y controladores, se lograron convergencias aceptables en cada etapa del periodo simulado; es decir, a medida que el flujo avanzaba (tendencia a un sistema estable), los residuales bajaban aún más.

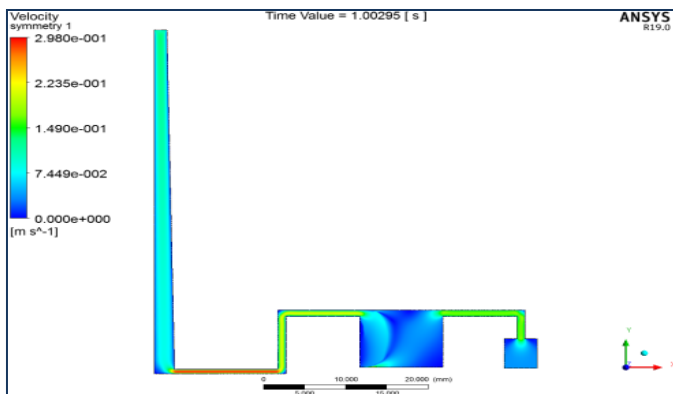
### **4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La figura 12 muestra la escala residual donde puede verificarse que a las 125,000 iteraciones, la ecuación de continuidad baja debido a que el plástico ABS ha salido por la frontera y el balance de masa se equilibra, por el contrario, las ecuaciones de momento y turbulencia (laminar) aumentan un poco sin dejar de estar dentro del criterio establecido para la convergencia.

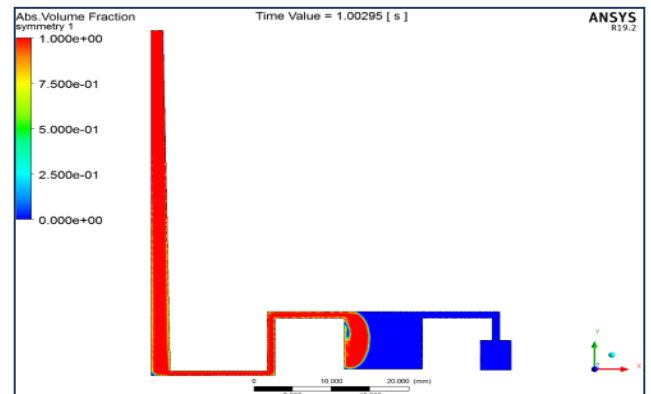


**Figura 12.** Escala de residuales.

En la figura 13 se presentan los resultados de los contornos de velocidad, se visualiza que la velocidad al tiempo de 1 segundo, en la cavidad del molde se presenta una gran cantidad de aire generando una turbulencia laminar (color verde jade) que empieza a ser desplazada por el plástico ABS (color rojo). En la figura 14, con velocidad de 1 segundo, en color rojo se visualiza como el plástico ABS comienza a llenar la cavidad del molde, siguiendo la trayectoria del aire desplazado.

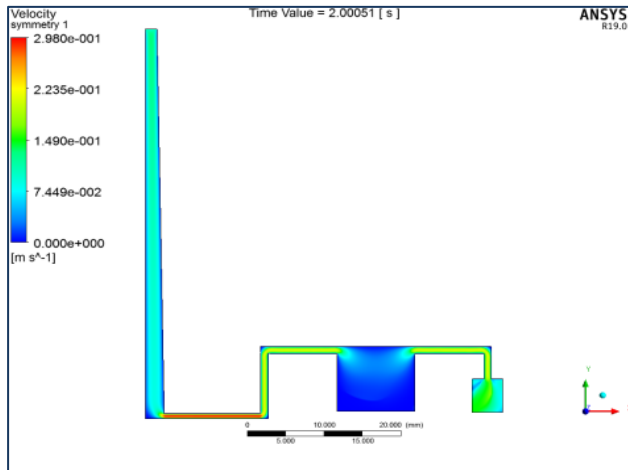


**Figura 13.** Contorno de velocidad a 1.0s.

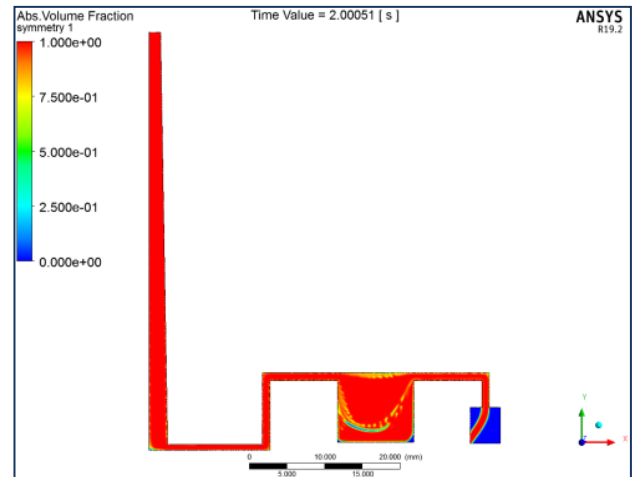


**Figura 14.** Contorno de fase a 1.0s.

En la figura 15 se visualiza que al tiempo de 2 segundos en la cavidad del molde comienza a reducirse el aire (color verde jade), en este momento, en la figura 16 muestra que el plástico ha llenado la cavidad del molde, sin embargo aún se mantienen algunas trazas de aire y en la superficie del molde se forma una contracción del plástico.

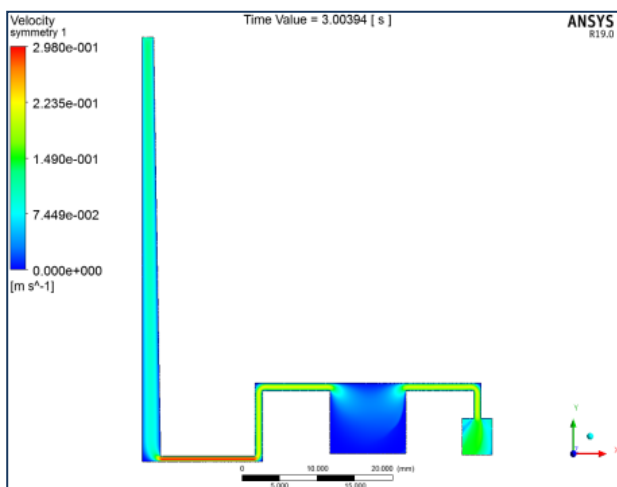


**Figura 15.** Contorno de velocidad a 2.0 s.

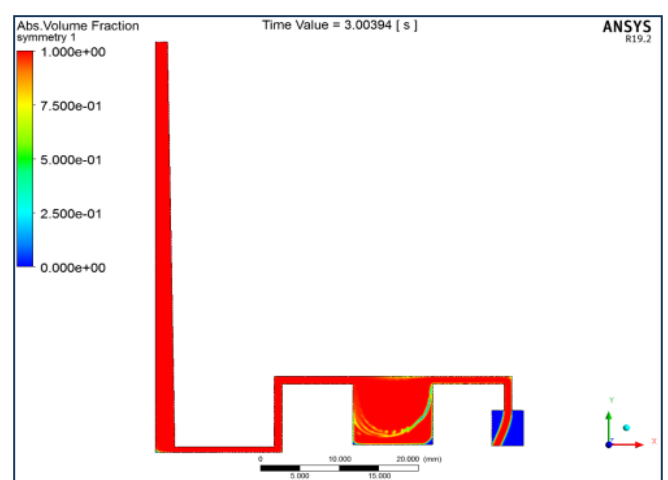


**Fig. 16.** Contorno de fase a 2.0s

El contorno de velocidad a los 3 segundos, en la figura 17 se visualiza que en la cavidad del molde comienza a reducirse el aire (color verde jade), en el molde continua la alimentación de plástico. La figura 18, muestra que la fase de color rojo es el 100% plástico ABS, y se ha eliminado la contracción del plástico.



**Figura 17.** Contorno de velocidad a 3.0 s.



**Fig. 18.** Contorno de fase a 3.0s.

De las figuras 13 a la 18 se observa lo siguiente:

- La cavidad se llena a los 2 segundos presentando solo algunas trazas de aire atrapado que paulatinamente va saliendo
- A partir de estos 2 segundos se observa una estabilidad del sistema ya que el balance de masa es alcanzado casi al 100%, aproximadamente a las 125 000 iteraciones, como lo muestra la figura 11 en la escala de residuales.
- La discretización del dominio resultó en 25 000 elementos (y las iteraciones resultan en 125 000) con una calidad mínima de 1 en la escala de ortogonalidad, donde el valor de 1 es el máximo valor de calidad y 0.15 como el mínimo requerido, lo que nos permite asegurar que los parametros para la simulación fueron los correctos.

## CONCLUSIONES

De lo anterior se puede observar que la simulación numérica es una herramienta poderosa para predecir el comportamiento de un sistema antes de construir el prototipo, sin embargo, existe la premisa de que el usuario debe atender con particular cuidado 2 aspectos; la veracidad de la información que ingresa al simulador y la robustez de los modelos matemáticos.

Respecto a la veracidad de la información podemos argumentar que los parámetros que cualifican al material plástico ABS determinado en PolyMat ( $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $m$ ), están calculados en base a datos experimentales y que el ajuste de la curva (para determinar dichos parámetros) es precisa.

Al Utilizar el modelo de Cross – Carreau para realizar la simulación numérica permitió aproximar la convergencia de los valores residuales a las 125,000 iteraciones en un tiempo de 3 segundos, como se estableció en nuestra hipótesis.

En forma general se tiene que si un esquema de aproximación es consistente y estable, es también convergente. En este sentido se tiene que en el caso que la malla de aproximación se refina, la solución de la ecuación de diferencias finitas (EDF) se aproxima a la solución.

Una aproximación de diferencias finitas a una EDP puede ser consistente, pero su solución no necesariamente puede converger a la solución real de la EDP. Un método numérico que es consistente y además estable, con lo que en definitiva se garantiza la convergencia.

La estabilidad de una aproximación numérica no tiene relación con la EDP misma, sino más bien con los problemas de aproximación y oscilaciones que pueden ocurrir al llevar a cabo operaciones aritméticas que se requieren para resolver las ecuaciones de diferencias finitas.

Sobre la robustez de los modelos matemáticos se concluye que los parámetros ajustados para el algoritmo de Fluent fueron adecuados y el caso se solucionó con los criterios de convergencia estándar (masa, momento y fases convergidos a  $\times 10^{-3}$ ).

Finalmente, con los datos ajustados se podrá proceder a un análisis del llenado de un molde completo para fabricar la pieza plástica y, dependiendo del método de solución podrían requerirse el ajuste de otros parámetros.

## **APORTACIONES DE LA TESIS**

Respecto a la veracidad de la información podemos argumentar que se aporta una secuencia para poder realizar la calibración y discretización de un análisis térmico en operaciones que involucren el uso de plásticos en operaciones de moldeo, si bien es cierto se tomo como elemento de análisis una pieza simple (bloque), estas condiciones pueden ser escalables en piezas más complejas. Sobre la robustez de los modelos matemáticos se concluye que los parámetros ajustados para el algoritmo de Fluent fueron adecuados y el caso se solucionó con los criterios de convergencia estándar (masa, momento y fases convergidos a  $\times 10^{-3}$ ). Es conveniente mencionar que este estudio sirvió como base para entender el proceso de inyección y aprender cómo realizar la simulación a piezas que se encuentran en etapa de diseño o incluso que ya están en producción masiva, sin embargo es importante mencionar que los resultados obtenidos en esta investigación pueden no ser los mejores para otro producto plástico, dependerá del problema que se presente o los requerimientos que se deban cumplir para poder evaluar los factores correctos. En general los pasos para realizar el análisis serán los mismos, solo cambiará la información correspondiente al producto (pieza, molde, máquina), y los parámetros de inyección pueden ser diferentes también.



## **RECOMENDACIONES**

Los resultados de esta investigación sirven para incentivar el uso del software Ansys Fluent en los análisis de inyección de plástico para cualquier producto que sea fabricado en una máquina de extrusión de plástico, ya que permite simular el proceso completo de inyección.

Se recomienda implementar el análisis de inyección de plástico para productos plásticos ya que de esta manera se pueden mejorar los procesos, ahorrar costos de fabricación al reducir defectos de calidad y hacer más eficientes los procesos de inyección en la empresa, a su vez, se puede ir ganando experiencia en este tipo de análisis y en base a los resultados se pueden ir creando estándares en el diseño de los productos y en la configuración de los parámetros de inyección, de esta manera cada vez será más fácil encontrar la solución a los defectos de calidad que se puedan presentar en los productos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Dynamic Temperature Control in Injection Molding with Conformal Heating/Cooling System*. **Ivascu, N., Fetecau, C. y Hill, R.** s.l. : Metallurgy and Materials Science. University of Galati, 2010, Metallurgy and Materials Science, Vol. Fascicle IX. ISS:1221-4566.
2. **S., Frank Kreith/ Raj M. Manglik/Mark.** *Principios de transferencia de Calor*. México : Cengage, 2012.
3. **Kern, Donald Q.** *Procesos de Transferencia de Calor. Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico : Continental S.A. de C.V., 1999, págs. 25-27.
4. *Finite Element Thermal Analysis of conformal cooling channels in injection moulding*. **Saifullah, A.B.M. y Masood, S.H.** 2007, 5th Australian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007. Brisbane, Australia.
5. *Simulación del llenado de moldes con el uso de OpenFOAM*. **Fonseca, Edgar, y otros.** 2014, Jornadas de Investigación. Encuentro Académico Industrial (Jifi).
6. **Cengel, Yunus A.** *Transferencia de Calor y Masa*. México : Mc Graw Hill, 2015.
7. **Askeland, Donald R.** *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mexico : Cengage, 2017.
8. **Valadez, José Ángel Manrique.** *Transferencia de Calor*. Oxford : Oxford University Press México, S.A. de C.V., 2012.
9. **Holman, J.P.** *Transferencia de Calor*. 8.a Edición. Madrid : McGraw Hill / Interamericana de España, S.A.U., 1998. págs. 60-61.
10. **Cruz, Francisco Gerardo Saucedo.** *Desarrollo de un Sistema de Pre evaluación de moldes para Piezas Plásticas Automotrices que conforman el interior de un vehiculo*. Tesis M.M.A Aguascalientes, CIATEQ, 144 P. Aguascalientes : s.n., 2018.
11. **UL LLC.** *Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas Generic ABS*. [En línea] PROSPECTOR, 2018. [Citado el: 20 de Febrero de 2018.] <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>.
12. **Canto, Tomas José Acosta.** *Metacrilatos*. Net. [En línea] 17 de Enero de 2017. [Citado el: 2 de Febrero de 2018.] <https://www.metacrilatos.net/2017/01/todo-lo-que-necesita-saber-sobre-el.html>.
13. *Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Propiedades Tipicas Generales*. **Styrolution, Ineos.** 2015, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), págs. 30-34.
14. *Simple Rheological Analysis Method of Spinnable-Polymer Flow Porperties Using MFI Tester*, pp. 1-8. **Younes, B.**
15. **Leal, José Martín Melchor.** *Estudio de Recubrimientos y Tratamientos de Superficie de Nueva Generación para Optimizar la Vida Útil de moldes de inyección*. Tesis, M.M.A. Aguascalientes, CIATEQ, 138 P. Aguascalientes : s.n., 2014.
16. **Ensinger.** *Ensinger Plastics*. [En línea] 08 de octubre de 2019. [Citado el: 08 de octubre de 2019.] <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plasticos-de-ingenieria>.
17. **Rodríguez, Felipe Díaz del Castillo.** *Conformado de Materiales Plásticos*, Tesis M. en I. Cuautitlan Izcalli, 86 P. 2012.

18. **(PPI), Procesos plasticos Inyectados.** Procesos Plásticos Inyectados (PPI). [En línea] [Citado el: 6 de Octubre de 2019.] <http://ppi.com.mx/Servicios/que-es-la-inyeccion-de-plasticos.html>.
19. **Sánchez, José Manuel Albarrán.** *Diseño y Fabricación de un Molde para Inyección en Plástico.* Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Madrid. 129 p. Madrid : s.n., 2014.
20. **Vargas, Pablo.** Privarsa. [En línea] 7 de Enero de 2017. [Citado el: 1 de Octubre de 2019.] <https://www.privarsa.com.mx/moldeo-por-inyeccion-de-plastico>.
21. **Kern, D.Q., y A.D. Kraus.** *Extended Surface Heat Heat Transfer.* Nueva York : McGraw-Hill Book Company, 1972.
22. **Juárez, Víctor Leonardo Teja.** *Generación de Mallas Numéricas para Geometrías Irregulares y Complejas.* Cuernavaca, Morelos : s.n., 2011.
23. **Fco. Eugenio López Guerrero y Lionel S. Méndez P.** *Simulación por Elemento Finito de la Distribución de Temperatura.* s.l. : Departamento de Servicios Integrados de Manufactura.
24. **Qv, José Miguel Quilodran V.** Academia. Academia. [En línea] [Citado el: lunes 4 de febrero de 2019.] [https://www.academia.edu/6039104/Moldeo\\_por\\_Inyección](https://www.academia.edu/6039104/Moldeo_por_Inyección).