



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN PARA PREDECIR LA  
DISTRIBUCIÓN DEL ESPESOR DE PARED EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO  
DE TERMOPLÁSTICOS MEDIANTE SOFTWARE ESPECIALIZADO

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero Mecánico

AUTORES: ENRIQUE GEOVANNY ÁLVAREZ HIDALGO  
LUIS DAVID PINEDA SUQUILANDA

TUTOR: ING. JORGE ISAAC FAJARDO SEMINARIO, PHD.

Cuenca - Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Enrique Geovanny Álvarez Hidalgo con documento de identificación N° 0705133015 y Luis David Pineda Suquilanda con documento de identificación N ° 1104913460; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 25 de abril del 2022

Atentamente,



Enrique Geovanny Álvarez Hidalgo  
0705133015



Luis David Pineda Suquilanda  
1104913460

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Enrique Geovanny Álvarez Hidalgo con documento de identificación N° 0705133015 y Luis David Pineda Suquilanda con documento de identificación N° 1104913460, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un procedimiento de simulación para predecir la distribución del espesor de pared en el proceso de termoformado de termoplásticos mediante software especializado” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de abril del 2022

Atentamente,



Enrique Geovanny Álvarez Hidalgo  
0705133015



Luis David Pineda Suquilanda  
1104913460

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Jorge Isaac Fajardo Seminario con documento de identificación N° 0102495777, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN PARA PREDECIR LA DISTRIBUCIÓN DEL ESPESOR DE PARED EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO DE TERMOPLÁSTICOS MEDIANTE SOFTWARE ESPECIALIZADO, realizado por Enrique Geovanny Álvarez Hidalgo con documento de identificación N° 0705133015 y por Luis David Pineda Suquilanda con documento de identificación N° 1104913460, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de abril del 2022

Atentamente,



Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario, Ph.D.  
0102495777

## **Dedicatoria**

### **Geovanny**

Parte de este documento quiero dedicar a mis sagrados Padres Rosa y Enrique, pues con sus bendiciones, paciencia y apoyo incondicional estoy cumpliendo una de las metas más importantes de mi vida.

También a mis queridos tíos Colon, Karina, Ruth y Wilton quienes sembraron en mí, las bases de la responsabilidad y deseo de superación, pues son el espejo en el que me quiero ver reflejado toda mi vida.

Y a mis amadas Abuelas Marlene y Rosario quienes a pesar de mi humanidad, siempre creyeron en mí y estuvieron para darme su amor incondicional en los buenos y malos momentos.

### **Luis**

A Dios por todo lo que ha puesto en mi camino que me ha llevado hasta aquí.

A mi familia, mis amigos y todo aquel que alguna vez creyó en mí que lograron que este sueño se vuelva realidad.

## Agradecimientos

**Geovanny**

A cada uno de los docentes de la carrera de Ing. Mecánica por haberme brindado los conocimientos que hoy me forman como profesional a beneficio de la sociedad, pues para mí representan el Alma Mater de esta Universidad.

De manera especial a nuestro Director de carrera y Tutor de tesis Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario, Ph.D por el tiempo y dedicación brindados durante este proyecto de titulación y durante todos los años de formación en mi carrera universitaria.

**Luis**

En primera instancia agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría los que me han ayudado a llegar al punto que me encuentro, sencillo no ha sido, pero gracia por transmitirme sus conocimientos y dedicación  
A mi universidad por permitirme convertir en ser un profesional en lo que tanto me apasiona.

## **Resumen**

En el presente trabajo de investigación se desarrolla el proceso de termoformado mediante el uso de software especializado para obtener el espesor de pared; como un análisis de los factores que se deben tomar a consideración, primero se investiga las variables que inciden en el termoformado y un modelo matemático para predecir el espesor de pared, luego se plantea dos casos para el desarrollo del proceso. En el primer caso se usa los datos iniciales y resultados obtenidos por una investigación en donde se realiza el termoformado experimental de un vaso cónico profundo, empleando una lámina de poliestireno de alto impacto a 185°C de 2mm de espesor; a partir de estos datos se calcula el espesor de pared mediante elementos geométricos y elementos finitos, los cuales se comparan con los resultados experimentales obteniendo un error cuadrático medio de: 13.4% frente a los resultados obtenidos de manera analítica y 2.2% frente los obtenidos mediante elementos finitos. Para el segundo caso se realiza el termoformado experimental de una carcasa de lampara ocupando un molde positivo elaborado en madera, se emplea una lámina de poliestireno de alto impacto de 2mm de espesor a una temperatura de 155°C; con los mismos datos se obtiene el espesor de pared mediante software especializado y finalmente se comparan los resultados experimentales frente a los obtenidos por el software, los cuales presentaron un error cuadrático medio de 1.53%.

### **Palabras claves:**

Termoformado, espesor de pared, presión de vacío, elementos finitos, elementos geométricos.

## **Abstract**

In the present research work, the thermoforming process is developed through the use of specialized software to obtain the wall thickness; As an analysis of the factors that must be taken into consideration, first the variables that affect thermoforming and a mathematical model to predict the wall thickness are investigated, then two cases are considered for the development of the process. In the first case, the initial data and results obtained by an investigation are used in which the experimental thermoforming of a deep conical glass is carried out, using a 2mm thick high-impact polystyrene sheet at 185°C; From these data, the wall thickness is calculated using geometric elements and finite elements, which are compared with the experimental results, obtaining a mean square error of: 13.4% compared to the results obtained analytically and 2.2% compared to those obtained by finite elements. For the second case, the experimental thermoforming of a lamp housing is carried out occupying a positive mold made of wood, a 2mm thick high-impact polystyrene sheet is used at a temperature of 155°C; With the same data, the wall thickness is obtained using specialized software and finally the experimental results are compared with those obtained by the software, which presented a mean square error of 1.53%.

### **Keywords:**

Thermoforming, wall thickness, vacuum pressure, finite elements, geometric elements.



# Índice

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	III
Dedicatoria .....	IV
Agradecimientos .....	V
Resumen.....	VI
Abstract .....	VII
Índice .....	VIII
Lista de Figuras .....	XI
Lista de Tablas .....	XII
Glosario.....	XIII
1. Introducción.....	1
2. Problema.....	1
2.1. Antecedentes .....	1
2.2. Problema general .....	5
2.3. Problemas específicos.....	6
3. Justificación .....	7
4. Beneficiarios.....	8
5. Objetivos .....	8
5.1. Objetivo general.....	8
5.2. Objetivos específicos .....	8
6. Marco teórico.....	8
6.1. Termoformado.....	8
6.2. Tipos de termoformado. ....	9
6.2.1. Termoformado al vacío .....	10
6.2.2. Termoformado a presión .....	11
6.2.3. Termoformado mecánico.....	12
6.3. Poliestireno de alto impacto .....	13
6.4. Polietileno de baja densidad.....	13
6.5. Comportamiento de los materiales termoplásticos durante el calentamiento.....	13
6.6. Reología de Polímeros .....	14
6.6.1. Modelo de Carreau – Yasuda.....	15
6.6.2. Modelo de Cross - WLF.....	15

6.7. Variables del proceso .....	16
6.8. Método de elementos finitos .....	20
6.8.1. Modelo integral KBKZ .....	21
6.8.2. Tipos de elementos finitos: .....	21
6.9. Método de elementos geométricos.....	23
6.9.1. Molde cónico.....	23
6.9.2. Formación de moldes cónicos truncados.....	25
6.10. Perfiles de distribución de espesor .....	27
6.10.1. En moldes cónicos truncados profundos .....	27
6.10.2. En moldes cónicos truncados poco profundos .....	28
7. Metodología. ....	30
7.1. Análisis del proceso.....	31
7.1.1. Termoformado de un vaso cónico .....	31
7.1.2. Termoformado de una carcasa de lámpara. ....	32
7.2. Análisis de elementos geométricos.....	37
7.3. Análisis mediante elementos finitos .....	39
7.3.1. Termoformado de un vaso cónico .....	41
7.3.2. Termoformado de una carcasa principal de lámpara. ....	46
7.4. Ensayos de laboratorio .....	50
8. Análisis de resultados.....	51
8.1. Termoformado de un vaso cónico .....	51
8.1.1. MEG .....	52
8.1.2. FEM.....	53
8.2. Termoformado de una carcasa de lámpara .....	56
9. Conclusiones .....	57
10. Recomendaciones .....	58
11. Referencias .....	59
12. Apéndices .....	65
12.1. Apéndice 1 .....	65
12.2. Apéndice 2.....	65
13. Anexos .....	66
13.1. Script en Matlab para el MEG .....	66
13.2. Guía de programación del módulo Polyflow .....	69
1. Geometría.....	70
1.1. Importar geometría .....	70
1.2. Nombrar bordes .....	71

2. Mallado.....	72
3. Configuración .....	73
3.1.1. Crear tarea para la solución mediante FEM.....	74
3.1.2. Definir el molde .....	75
3.1.3. Definir el material de la preforma.....	79
3.1.4. Configurar parámetros numéricos para llegar a la convergencia de la solución .....	82
3.1.5. Solución.....	82
3.1.6. Resultados .....	83

## Lista de Figuras

Figura 1: Termoformado al vacío empleando un molde positivo.....	10
Figura 2: Etapas del termoformado al vacío.....	11
Figura 3: Termoformado a presión.....	12
Figura 4: Termoformado mecánico.....	12
Figura 5: Elemento finito bidimensional.....	22
Figura 6: Elemento finito tridimensional.....	22
Figura 7: Elementos incorrectos.....	22
Figura 8: Detalles de una cavidad cónica.....	24
Figura 9: Detalles de un molde cónico truncado profundo; posición de la burbuja en $Z = ZT$ ....	26
Figura 10: Detalles de un molde cónico truncado poco profundo; posición de la burbuja en $X=X'T'$ . .....	26
Figura 11: Etapas del análisis de este estudio.....	30
Figura 12: Medidas del molde cónico truncado.....	31
Figura 13: Lámpara de sala elaborada en material ABS.....	32
Figura 14: Máquina termoformadora con presión de vacío negativa.....	33
Figura 15: Molde positivo empleado para el termoformado.....	33
Figura 16: Preparación de la lámina de PSAI.....	34
Figura 17: Calentamiento de la lámina de HIPS.....	34
Figura 18: Foto térmica captada a los 33 segundos de calentamiento.....	35
Figura 19: Pieza termoformada.....	35
Figura 20: Resultados experimentales de la deformación de malla.....	36
Figura 21: Corte realizado a la pieza termoformada.....	36
Figura 22: Momento que el polímero HIPS entra en contacto con el fondo del molde.....	38
Figura 23: Momento que el PSAI llega a la arista del fondo.....	38
Figura 24: Ejemplo de la proyección de espesores sobre el plano de análisis.....	39
Figura 25: Diagrama de flujo de la programación del software especializado.....	40
Figura 26: Mallado del molde.....	42
Figura 27: N.º de elementos y nodos generados en cada tamaño de malla, caso 1.....	43
Figura 28: Función de rampa para la velocidad del molde y presión de vacío del caso 1.....	43
Figura 29: Resultados gráficos obtenidos para el caso 1.....	45
Figura 30: Superficies de molde y preforma empujada para el FEM.....	46
Figura 31: Mallado de molde positivo. a) Mallado por defecto con tamaño de elemento de 0.016 m. b) Resultados obtenidos con la malla por defecto. c) Refinamiento de malla con tamaño de elemento de 0.003 m. y d) Resultados obtenidos con la malla refinada.....	47
Figura 32: N.º de elementos y nodos generados para cada tamaño de malla, caso 2.....	48
Figura 33: Función de rampa para la velocidad del molde y presión de vacío del caso 2.....	48
Figura 34: Zonas de análisis para la pieza termoformada.....	49
Figura 35: Resultados del FEM para el caso 2.....	50
Figura 36: Datos experimentales del termoformado de un vaso cónico.....	52
Figura 37: Resultados del caso 1 obtenidos de manera experimental y MEG.....	53
Figura 38: Resultados del caso 1 obtenidos de manera experimental y FEM.....	54
Figura 39: Resultados obtenidos por MEG utilizando HIPS y LDPE.....	55
Figura 40: Resultados obtenidos por FEM a diferente presión de vacío.....	56
Figura 41: Resultados obtenidos de manera experimental y mediante FEM para la carcasa de lámpara.....	57
Figura 42: Superficies de contacto del molde y film.....	70

Figura 43: Proceso para importar una geometría desde la memoria del equipo.....	71
Figura 44: Ejemplo de cómo nombrar a las aristas de la preforma. ....	72
Figura 45: Menús de Details View y Tree Outline.....	72
Figura 46: Pasos para generar el mallado.....	73
Figura 47: Ventana de la herramienta Polydata. ....	74
Figura 48: Menú de la tarea F.E.M. ....	75
Figura 49: Menú del molde generado.....	75
Figura 50: Opciones de evolución para configurar el movimiento del molde.....	77
Figura 51: Gráfica de la función rampa. ....	77
Figura 52: Menú de la nueva capa creada con el nombre Polímero. ....	79
Figura 53: Menú de la sección Material data.....	80
Figura 54: Ventana de la herramienta para ajuste de curvas Polymat. ....	81
Figura 55: Menú del modulo Polyflow antes de generar la solución.....	83

## Lista de Tablas

Tabla 1. Investigaciones realizadas sobre el termoformado.....	2
Tabla 2: Variables que inciden en el proceso de termoformado. ....	16
Tabla 3: Parámetros principales empleados en el FEM del caso 1. ....	41
Tabla 4: Porcentajes de error para espesores con diferente tamaño de elemento del caso 1.....	42
Tabla 5: Parámetros del modelo Carreau – Yasuda para HIPS y LDPE a 185 °C. ....	44
Tabla 6: Parámetros de malla empleados para el FEM. ....	45
Tabla 7: Parámetros principales empleados en el FEM del caso 2. ....	46
Tabla 8: Porcentajes de error para espesores con diferente tamaño de elemento del caso 2.....	47
Tabla 9: Parámetros del modelo de Cross para HIPS a 155 °C. ....	49
Tabla 10: Equipos, instrumentos y software empleados para el ensayo reológico. ....	50
Tabla 11: Parámetros iniciales de los ensayos reológicos. ....	50
Tabla 12: Valores de viscosidad obtenidos para el HIPS a 185 °C.....	51
Tabla 13: Valores de viscosidad obtenidos a 155 °C.....	51
Tabla 14: Parámetros del problema de contacto.....	79
Tabla 15: Descripción y función de los parámetros de iteración. ....	82

## Glosario

Algoritmo:	Representa un conjunto, a menudo enorme, de operaciones aritméticas como suma, resta, multiplicación y división (Skiba, 2005).
Método de elementos finitos:	Es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real (Autodesk, s. f.).
Polímero:	Es un compuesto orgánico, que puede ser de origen natural o sintético, con alto peso molecular, formado por unidades estructurales repetitivas llamadas monómeros (Cedrón et al., 2011).
Reblandecimiento de un polímero:	Estado en que un material plástico pasa de un estado rígido a un estado gomoso y blando (Ingeniería, 2015).
Termoformado:	Proceso en el cual un termoplástico laminado se calienta hasta que se reblandece y se le da forma conformándolo a un molde (Alvarez, 1997).
Viscoelástico:	Propiedad que determina la deformación que experimenta un material cuando se somete a combinaciones de esfuerzo y temperatura a través del tiempo; como su nombre lo indica es una combinación de viscosidad y elasticidad (Groover, 1997).

# **1. Introducción**

El proceso de termoformado es una de las técnicas más populares utilizadas en el procesamiento de polímeros; es posible una amplia aplicación de termoformado debido a su alto rendimiento, simplicidad, compacidad y costo de equipo relativamente bajo (Azdast et al., 2013). Las técnicas para llevar a cabo los procesos involucrados son en gran parte empíricas, en la mayoría de investigaciones se dan algunos cálculos muy aproximados de las fuerzas y presiones requeridas. No hay ningún método descrito para realizar los cálculos con mayor precisión, aunque se han hecho algunas observaciones generales sobre cómo se podría encontrar una solución (Williams, 1970). En la mayoría de los casos, el objetivo principal del procesamiento es lograr una distribución controlada del espesor de la pared en el producto final. La simulación por computadora de tales procesos tiene un interés comercial considerable y en los últimos años muchos esfuerzos de investigación se han dirigido hacia el modelado del termoformado; sin embargo, el progreso ha sido relativamente lento y esto se atribuye en gran medida a la necesidad de que los investigadores comprendan a fondo los fenómenos físicos clave en el proceso, como la deformación del material a alta tasa de deformación (McCool et al., 2006). Es por esto que es necesario realizar el estudio de la distribución de espesores de pared en el proceso de termoformado, mediante el método analítico y de elementos finitos, de tal manera que se pueda entender a detalle los factores que intervienen en este fenómeno físico.

## **2. Problema**

### **2.1. Antecedentes**

El termoformado es un proceso industrial en el que la lámina (o película) termoplástica se procesa en una nueva forma utilizando calor y presión. Este fue uno de los primeros procesos usados en la industria del plástico, comenzando con la formación de la lámina de nitrato de celulosa a mediados del siglo XIX. El crecimiento aumentó dramáticamente a medida que se desarrollaron nuevos materiales y aplicaciones. Por ejemplo, la necesidad de toldos de aviones en la Segunda Guerra Mundial junto con el desarrollo de metacrilato de polimetilo (acrílico) creó la oportunidad perfecta para avanzar en la tecnología de proceso de termoformado (Klein, 2009).

Durante los años cincuenta, la producción de termoplásticos y los productos elaborados con ellos alcanzaron altas cifras. La década de los 60's fue una era que cimentó las bases del futuro, desarrollando la industria del termoformado. En los 70's, la demanda de grandes

consumidores y la variedad de productos, demandaron maquinaria de alta velocidad y productividad; los fabricantes satisficieron dichas necesidades con maquinaria capaz de producir alrededor de mil contenedores individuales termoformados por hora. También existió la necesidad de sofisticar los controladores; desde la década de los 80's hasta la fecha, las maquinas termoformadoras han ganado bastante confianza en su proceso, que han ido más allá de sus expectativas y han establecido líneas continuas de producción en donde el material inicial a transformar es pellet de resina; además de reciclar su desperdicio con un mínimo de control (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

En los últimos 6 años, se han realizado algunas publicaciones en las cuales se estudia el efecto de las variables del proceso de termoformado en la distribución de espesores del producto final, así también la importancia del uso de métodos estadísticos como el diseño de experimentos, que otorgan opciones de optimización del proceso, disminuyendo el número de pruebas y errores (Acevedo & Chávez, 2015). En la (Tabla 1) se exponen 4 investigaciones científicas encaminadas al termoformado:

Tabla 1. Investigaciones realizadas sobre el termoformado.

<b>Autor (Año)</b>	<b>Título</b>	<b>Descripción</b>	<b>Software utilizado</b>
Carlos Belmonte Picazo (2012)	Desarrollo de sistema de Bajo coste para Termoformado por vacío de láminas plásticas	El autor propone la elaboración de un sistema orientado a la fabricación personal, permitiendo elaborar el prototipo a un bajo costo de manera que se pueda mejorar a futuro sin ocasionar un gran impacto económico; quedando pendiente la optimización a nivel estructural y eléctrico del sistema, lo que dará un valor agregado a la máquina disminuyendo costes innecesarios y mejorando el proceso.	Open source
Ertugrul Selcuk Erdogan, Olçay Eksi. (2013)	Predicción de la distribución del espesor de la pared en moldes de termoformado simples	En este documento, las operaciones de termoformado experimentales se llevaron a cabo utilizando polipropileno (PP) reforzado con fibra de carbono, y láminas termoplásticas de poliestireno de alto impacto (HIPS) no reforzadas. Los parámetros de procesamiento se determinaron para cada material termoformado y se realiza la simulación mediante software especializado para luego compararlos frente a los resultados experimentales.	LS DynaTM



Przemyslaw Poszwa, Marek Szostak. (2016)	Simulación del proceso de termoformado con el software ANSYS Polyflow	Se evalúa la influencia de los parámetros del proceso y la geometría del molde con el software ANSYS Polyflow. Para una descripción precisa del comportamiento del polímero, se empleó el modelo integral viscoelástico (KBKZ)	Ansyes Polyflow
Michal Modlawski, Tomasz Jaruga. (2018)	Simulación por computadora del proceso de termoformado y su verificación empleando un molde de herramientas rápido	Se evalúa la posibilidad de usar un molde fabricado por la tecnología de modelado de deposición fundida en el diseño correcto de un producto termoformado. Se evalúa la eficiencia de la simulación por computadora de la distribución de espesor de pared, mediante la comparación de los resultados del proceso de termoformado y el resultado de la simulación.	Ansyes Polyflow
Juan Gabriel Espinosa Aguilar. (2019)	Evaluación del proceso de termoformado para la obtención de la carcasa de la alarma ChevyStar, utilizando ingeniería inversa y Simulación por elementos finitos.	Se obtiene la geometría de la carcasa de la alarma ChevyStar, usando ingeniería inversa, para la generación del diseño y construcción del molde. Se realiza la simulación del proceso de termoformado de la carcasa, mediante software especializado, determinando el espesor óptimo del poliestireno de alto impacto a emplear en la construcción de la autoparte. Se analiza los espesores de la carcasa obtenidas de manera experimental, con los resultados generados por la simulación y con las piezas físicas que se ofertan en el mercado, para validar el proceso de fabricación de las mismas.	Ansyes Polyflow

Fuente: Autor.

El proceso de termoformado requiere de una máquina que realice de manera sistemática los productos, estas máquinas son empleadas por la mayoría de las industrias; sin embargo, para (Belmonte, 2012), después de haber realizado un estudio concienzudo de las variables teórico-prácticas implicadas en el proceso de deformación por efecto de la presión y alta temperatura de láminas termoplásticas, concluyó que dicho estudio se puede emplear en la mejora de un sistema de termoformado por vacío. Para el resultado de su trabajo ha sido crucial la elaboración de una máquina similar durante la asignatura de Prototipado Rápido del Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Computador, pues, a pesar que

no se tuvieron en cuenta todos los factores implicados en el proceso, se lograron observar todos los errores y debilidades generados, aportando así experiencia práctica para la conceptualización de una nueva máquina que evitara estos problemas.

Para los autores (Selcuk & Olcay, 2013), los experimentos actuados en los productos termoformados, muestran claramente que uno de los parámetros principales que afecta la distribución del espesor de la pared es la geometría del anillo de sujeción. Se propone seleccionar una geometría de herramienta de sujeción circular para productos cilíndricos y cónicos y una rectangular para productos rectangulares. Eso puede equilibrar la tensión en todas las direcciones y proporcionar características de deformación uniformes, lo que resulta en una distribución de espesores más uniforme.

Por otra parte, y como conclusión de su investigación, (Poszwa & Szostak, 2016) exponen que la altura del molde tiene una fuerte influencia en el tiempo del ciclo, que depende del grosor local de la lámina, la distancia al recorrido y el refuerzo de la lámina. Debido a estos aspectos, la disminución de la altura no conduce a una disminución del tiempo del ciclo. Por otro lado, el aumento de la altura del molde en 10 mm disminuye ligeramente el tiempo del ciclo, pero el aumento de la altura del molde en 20 mm aumenta significativamente el tiempo del ciclo; el aumento del grosor de la lámina conduce a un aumento significativo del tiempo de ciclo, lo que es el resultado del mayor grosor de las regiones que mapean las esquinas del molde (Poszwa & Szostak, 2016).

En cambio, para los autores (Modlawski & Tomasz, 2018), la desviación del grosor de la pared entre la simulación y el experimento no supera el 23,4%. El valor promedio de esta desviación es del 2,5%. El enfoque de usar la simulación en el primer paso del proceso de diseño puede brindar algunos beneficios, ya que puede ayudar a evitar áreas excesivamente delgadas del producto al rediseñar el molde antes de su fabricación; es posible utilizar moldes de herramientas rápidas fabricados con tecnología FDM en la producción a corto plazo o en pruebas de una herramienta de nuevo diseño, este tipo de molde puede funcionar bien y se puede obtener un producto termoformado de buena calidad, mientras que el tiempo de fabricación del molde suele ser corto.

Finalmente, está la presentación de (Espinosa, 2019), quien sustenta al final de su tesis que, con los resultados obtenidos de manera experimental y en la simulación, se determinó que el espesor inicial de la lámina del poliestireno de alto impacto óptimo para su trabajo es

de 2 mm, pues en los resultados obtenidos en la simulación la distribución de espesores presenta un valor promedio de 1.6 mm y en el termoformado experimental tiene un valor promedio de 1.7 mm, acercándose al espesor de la pieza real que es de 1,5 mm; además, las dimensiones obtenidas en las piezas experimentales superan en 0.5 mm de las medidas reales, lo que no genera problemas en su funcionalidad.

Ahora bien, existen otros trabajos de grado asociados con el termoformado realizados en Ecuador; uno de ellos pertenece a los autores (Carvajal & Paredes, 2013), titulado “Automatización del sistema de termoformado de láminas de poliestireno para la empresa Latermec Cia. Ltda”. Esta investigación propone el diseño e implementación de un sistema de control para una máquina termoformadora, cuyo proceso de termoformado es una de las principales actividades de esta empresa; por tanto, la sistematización de este proceso es necesaria.

Asimismo, el trabajo de (Mayorga & Padilla, 2011) titulado “Automatización para el proceso de la máquina sopladora de envases plásticos de la empresa N.S. Industrias”, permite indagar un poco más en los conceptos inherentes en este estudio, pues los autores en sus objetivos recomiendan mejorar la tecnología de la máquina termoformadora como también el proceso de producción de la misma a través de la implementación de una tecnología moderna y acoplamiento de un cortador de rebabas plásticas.

A pesar que los trabajos de grado antes mencionados están enfocados únicamente en el funcionamiento de las máquinas de termoformado, es necesario considerar sus contenidos para obtener mayor información con relación al proceso de termoformado y las diversas variables que influyen en su desarrollo.

## **2.2. Problema general**

Una de las principales interrogantes al momento de diseñar un producto termoformado, es saber entre algunas características finales de la pieza, cómo sucederá la distribución real de los espesores, en las paredes del molde (Sánchez & Velásquez, 2005); con mucha frecuencia se observa no uniformidades en la distribución del grosor en algunas áreas, la lámina puede ser demasiado gruesa, mientras que en otras áreas, es demasiado delgada (Pepliński & Mozer, 2011). Tal como lo indican Paredes y Roque (2015), en la industria del termoformado se recurre al ensayo prueba y error para establecer las condiciones óptimas hasta obtener el

producto con los espesores adecuados, ocasionando pérdidas de tiempo en la calibración de la máquina. Como en los tiempos estimados en la puesta en marcha oscilan entre 4 a 5 horas para lograr las características adecuadas de la pieza termoformada, esto dependerá de la máquina y los productos (Cobos, 2009).

La simulación del proceso de termoformado, propone una opción para aplicar texturas de gran nivel de detalles a productos termoformados. Esto se consigue gracias al desarrollo de algoritmos (mediante software especializado) (Federico & DAVIS, 2016).

Para el análisis del termoformado, donde ocurre la deformación bajo la acción de flujos de gas perfectos, los métodos de elementos finitos (FEM) son muy adecuados. Debido al bajo espesor de las láminas poliméricas, deben usarse elementos planos. Las simulaciones numéricas de termoformado se pueden realizar con el módulo Polyflow perteneciente al software especializado de la casa comercial ANSYS en la versión 2021 R2, el cual contiene algoritmos que pueden analizar el sistema donde ocurren deformaciones finitas dinámicas de elementos planos. Permite la aplicación de muchas ecuaciones constitutivas diferentes, pero la descripción más precisa del comportamiento de la lámina polimérica se puede obtener con el modelo constitutivo viscoelástico integral, como el modelo KBKZ (iniciales de Kaye, Bernstein, Kearsley y Zapas) (Poszwa & Szostak, 2016).

Entonces surge la siguiente pregunta como problema general de la investigación:

¿Es posible desarrollar un procedimiento de simulación para predecir la distribución del espesor de pared en el proceso de termoformado de termoplásticos mediante software especializado?

Ante esta interrogante, se plantean de manera específicas algunos inconvenientes detallados a continuación:

### **2.3. Problemas específicos**

Una de las razones por las que las grandes industrias enfrentan problemas con relación al proceso de termoformado, se debe a las significativas variaciones de espesor de pared en toda la pieza, y las esquinas generalmente terminan en regiones más delgadas. Otros problemas incluyen inestabilidades físicas durante la inflación, principalmente la ruptura de

la lámina, así como la contracción y deformación de la parte final. Todas estas dificultades tienen un efecto enorme en el rendimiento y el costo de una pieza (Koziey et al., 1997).

Normalmente, el objetivo del termoformado será obtener el grosor de pared más uniforme posible en la pieza terminada. Debido a que el proceso utiliza una preforma de lámina y un molde de una sola superficie, no es posible generar características independientes en la segunda superficie. Estas consideraciones limitan la mayoría de los artículos termoformados a maneras relativamente simples (Maier & Calafut, 1998).

Ahora bien, una vez identificadas las diversas razones por las que se suscitan problemas en el proceso de termoformado para las grandes industrias, cabe replantearse lo siguiente:

- ¿Es posible definir las variables y las propiedades que influyen en el proceso de termoformado?
- ¿Se puede calcular los espesores finales para una geometría definida y diferentes tipos de materiales con la identificación de los puntos críticos?
- ¿Existe la posibilidad de realizar la validación de los cálculos de los espesores con software especializado verificando la diferencia entre los espesores calculados y resultados de la simulación?

### **3. Justificación**

El termoformado es un proceso de estiramiento diferencial, lo que significa que a medida que se estira la lámina, solo se estira la porción de la lámina que está libre del molde. Como resultado, el grosor de la pared del producto formado no es uniforme (J. L. Throne, 2001). Aunque se logra cierta mejora en el grosor de la pared mediante el estiramiento mecánico o neumático de la lámina caliente antes de tirar contra la superficie del molde, la tolerancia del grosor de la pared es típicamente del 10 al 20%. Como las áreas locales de los productos conformados están diseñadas con un espesor crítico mínimo, muchas partes de los productos conformados contienen más plástico del necesario para cumplir con los criterios de diseño (J. Throne, 2017).

Por otra parte, y con el fin de obtener piezas con una alta calidad de terminación y de resistencia, la tendencia actual para el análisis de procesos de este tipo se vuelca al empleo de simulaciones numéricas que requieren de modelos constitutivos y técnicas numéricas

robustas y apropiadas las cuales, validadas adecuadamente, representen lo más acertadamente posible el evento en estudio (Morales & Candal, 2004).

## **4. Beneficiarios**

Con la realización del presente estudio, se pretende proporcionar información que sea eficaz, confiable y estructurada que sea de utilidad en el campo de la investigación, sobre todo a las carreras de grado y postgrado, las cuales dedican cierta parte de su campo a los procesos de manufactura tales como Ingeniería Mecánica, Industrial y Mecatrónica; además crear oportunidades con mira hacia las industrias que empleen el termoformado en sus líneas de producción.

## **5. Objetivos**

### **5.1. Objetivo general**

- Desarrollar un procedimiento de simulación para predecir la distribución del espesor de pared en el proceso de termoformado de termoplásticos mediante software especializado.

### **5.2. Objetivos específicos**

- Definir las variables y las propiedades que influyen en el proceso de termoformado.
- Calcular los espesores finales para una geometría definida y diferentes tipos de materiales con la identificación de los puntos críticos
- Validación de los cálculos de los espesores con software especializado verificando la diferencia entre los espesores calculados y resultados de la simulación.

## **6. Marco teórico**

### **6.1. Termoformado**

El termoformado o termoconformado es el proceso en donde se emplea una lámina o película de material termoplástico también denominada preforma, para darle la forma deseada mediante un molde negativo o positivo, con la ayuda de presión positiva o negativa; consta de dos etapas principales: calentamiento y formado. El calentamiento se produce generalmente mediante radiadores eléctricos en uno o ambos lados de la lámina. El tiempo de calentamiento debe ser suficiente para ablandar la lámina, dependiendo del polímero, su

espesor y color. Los métodos de termoformado pueden clasificarse en tres categorías básicas (Groover, 1997):

- 1) Termoformado al vacío.
- 2) Termoformado a presión
- 3) Termoformado mecánico

El proceso de termoformado generalmente se segmenta en mercados de calibre delgado y de calibre grueso. Los mercados de calibre delgado tienden hacia los productos desechables, como los envases rígidos y los mercados de calibre grueso tienden hacia productos permanentes o industriales. Si la lámina inicial tiene menos de 1,5 mm de espesor, se denomina lámina de calibre delgado. Normalmente se extruye en forma de rollo, siendo los rollos de 1 a 1,5 m de diámetro; si la lámina inicial tiene más de 3 mm de espesor, se denomina lámina de calibre grueso (J. Throne, 2011).

El polímero es calentado por encima de su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) pero por debajo de su temperatura de fundido ( $T_m$ ), hasta llegar a un estado viscoelástico. De esta manera las cadenas poliméricas son moderadamente móviles y el polímero se deforma con facilidad, dado que su módulo de elasticidad ( $E$ ) es mucho menor que cuando se encontraba en estado sólido rígido. La preforma es entonces conformada contra las paredes de un molde, bien sea por medios mecánicos (herramientas, moldes sólidos) y/o por medios neumáticos (diferenciales de presión por la aplicación de aire comprimido o generación de vacío entre el molde y la lámina). La temperatura del molde debe ser constante e inferior a la temperatura de la lámina, de esta manera la preforma se enfría de nuevo ocupando la forma del molde (Joya, 2006).

## **6.2. Tipos de termoformado.**

Es conveniente distinguir aquí entre moldes negativos y positivos. Los moldes que se muestran en la (Figura 1) son moldes negativos porque tienen cavidades cóncavas, un molde positivo tiene una forma convexa; ambos tipos se usan en termoformado, en el caso del molde positivo, la lámina caliente recubre la forma convexa, y se utiliza presión negativa o positiva para forzar al plástico contra la superficie del molde. El molde positivo se muestra en la (Figura 1) para el caso de formado al vacío (Molina & Pito, 2008).

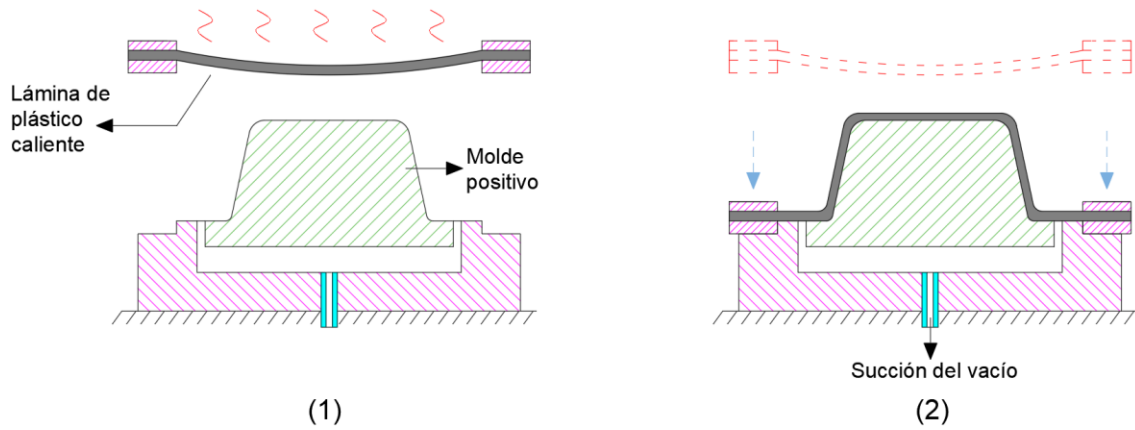


Figura 1: Termoformado al vacío empleando un molde positivo.

(1) Se suaviza una lámina plana de plástico por calentamiento. (2) Se bajan las mordazas de manera que la lámina tenga contacto con el molde y al mismo tiempo se realiza la succión por presión negativa.

Fuente: (Molina & Pito, 2008)

### 6.2.1. Termoformado al vacío

El método más antiguo es el termoformado al vacío (llamado simplemente formado al vacío en sus inicios, en los años cincuenta) en el cual se usa presión negativa para deformar la lámina precalentada dentro la cavidad del molde. El proceso se indica en la (Figura 2) en su forma más básica. Los orificios para hacer el vacío en el molde también llamados barrenos de vacío son del orden de 0.8 mm de diámetro, así se desprecian los efectos en la superficie de la lámina termoformada (Molina & Pito, 2008).



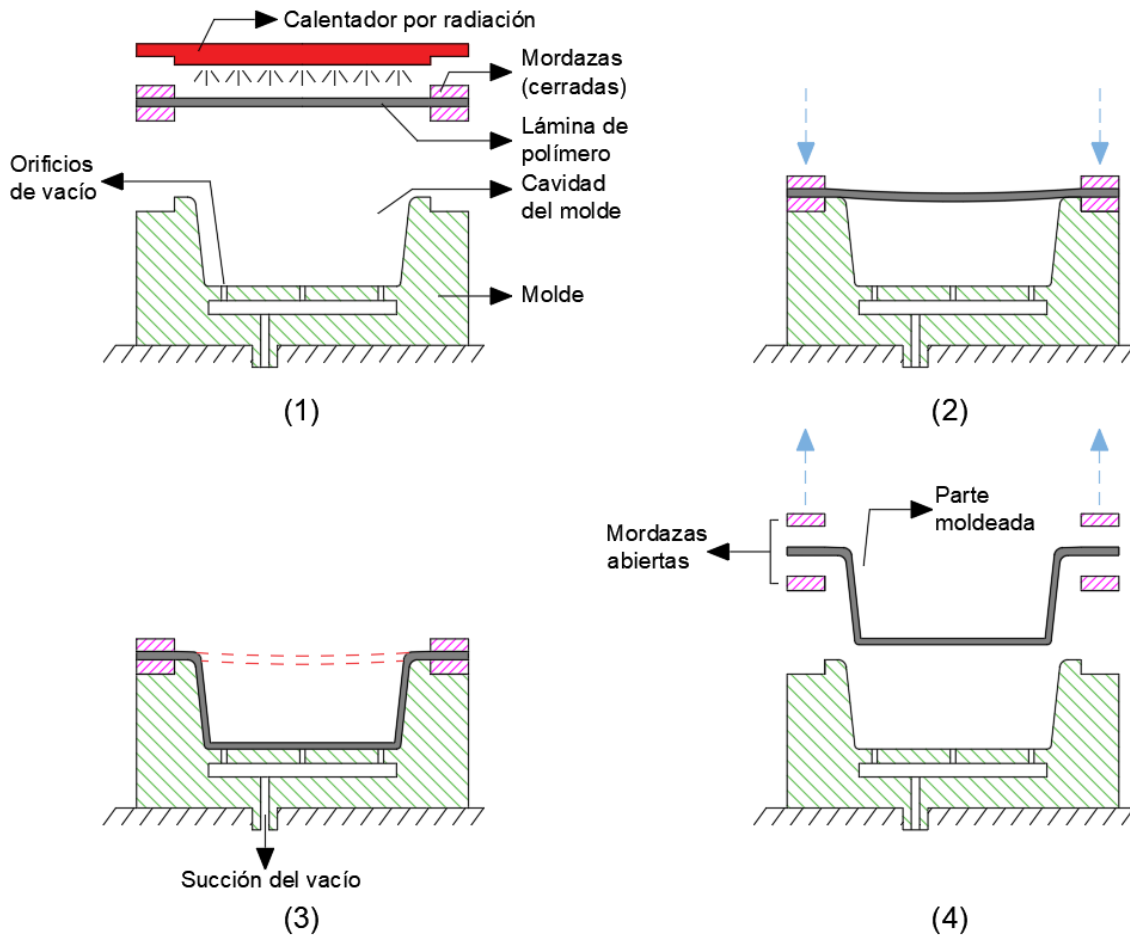


Figura 2: Etapas del termoformado al vacío.

(1) Se suaviza una lámina plana de plástico por calentamiento. (2) Se coloca sobre la cavidad de un molde cóncavo. (3) El vacío atrae la lámina hacia la cavidad. (4) El plástico se endurece al contacto con la superficie fría del molde, la parte se retira y luego se recorta de la hoja.

Fuente: (Molina & Pito, 2008).

### 6.2.2. Termoformado a presión

Otra opción del termoformado al vacío involucra presión positiva para forzar la preforma caliente dentro de la cavidad del molde. Este método se define como termoformado a presión o formado por soplado; su ventaja sobre el termoconformado al vacío radica en que se pueden desarrollar presiones más altas. Son comunes las presiones de formado de tres a cuatro atmósferas. El proceso es aparecido al anterior, la diferencia es que la preforma se presiona desde arriba hacia la cavidad del molde. Los orificios de ventilación en el molde permiten que salga el aire atrapado. La secuencia del proceso (pasos 2 y 3) se ilustra en la (Figura 3) (Molina & Pito, 2008).

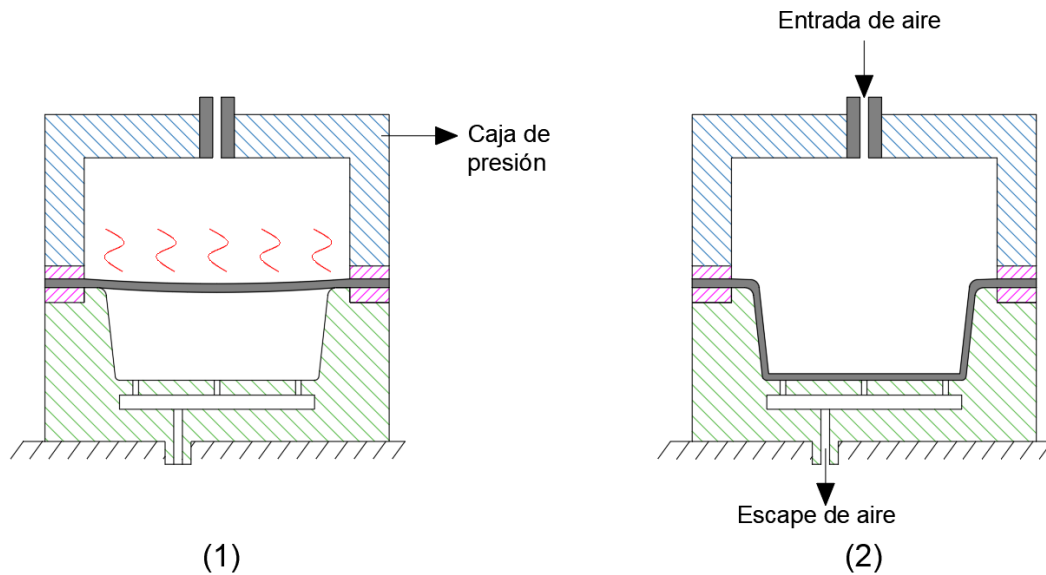


Figura 3: Termoformado a presión.

(1) La lámina se coloca sobre la cavidad del molde. (2) La presión positiva fuerza a la lámina dentro de la cavidad.

Fuente: (Molina & Pito, 2008).

### 6.2.3. Termoformado mecánico

También conocido por el nombre de termoformado mecánico, emplea un molde positivo que se aplica sobre una superficie de la preforma y un molde negativo que entrara en contacto con la otra superficie de la lámina, forzándola a asumir su forma. En este método no se utiliza vacío ni presión de aire. El proceso se ilustra en la (Figura 4). Las ventajas de este método es que permite un mejor control dimensional y la posibilidad de formar la superficie en ambos lados de la pieza. La desventaja de este método es la necesidad de tener dos moldes, por tanto, los otros dos métodos son menos costosos (Molina & Pito, 2008).

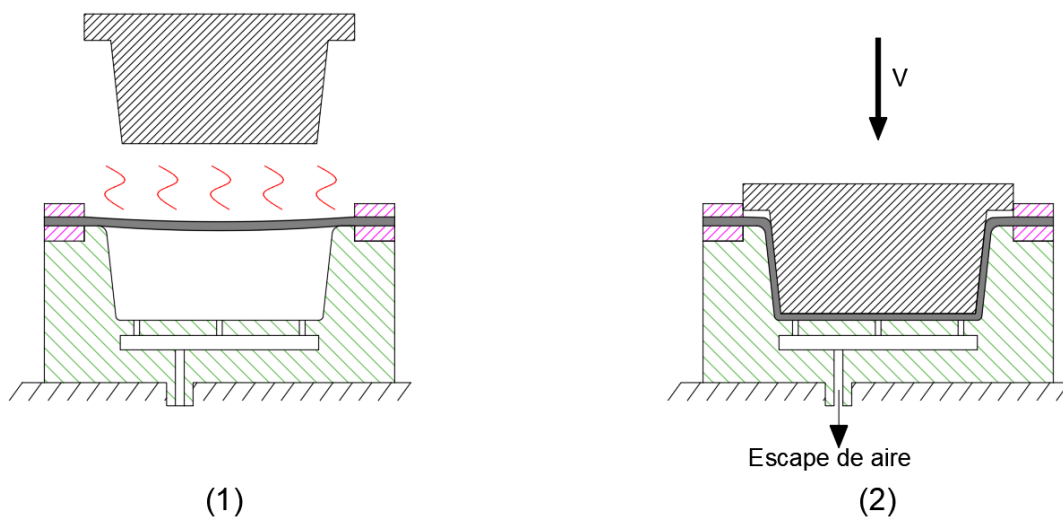


Figura 4: Termoformado mecánico

(1) Lámina caliente de plástico se coloca sobre el molde negativo. (2) Se cierra el molde para conformar la lámina.

Fuente: (Molina & Pito, 2008)

### **6.3. Poliestireno de alto impacto**

El Poliestireno de Alto Impacto, conocido en sus siglas en inglés como HIPS (High Impact Polystyrene), es un material plástico reforzado mediante la combinación de partículas elastoméricas, dando como resultado un material con propiedades de impacto mejoradas en comparación con el poliestireno cristalino.

Más detalladamente, HIPS se puede describir como una combinación de dos polímeros incompatibles, el poliestireno (PS) y el polibutadieno (PBd). En esta combinación de materiales, el polibutadieno (usado del orden de 6 a 8% p/p) se distribuyó en la fase de dispersión mientras que el poliestireno (compuesto de 92 a 94% p/p) forma una fase continua o matriz (Villarreal, 2009).

### **6.4. Polietileno de baja densidad**

Es un polímero de cadena ramificada, se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones por el mecanismo de radicales libres; contiene sustituyentes alquilo, o pequeñas ramificaciones en la estructura de la cadena, dichas ramificaciones se producen durante el proceso de síntesis; su densidad está comprendida entre  $0.910 - 0.925 \text{ g/cm}^3$ ; es incoloro, inodoro y no toxico (Roca, 2005).

### **6.5. Comportamiento de los materiales termoplásticos durante el calentamiento**

Es importante tomar en cuenta el comportamiento de estos materiales a la hora de realizar el calentamiento, pues existen diversos factores influyentes en los resultados. Estos factores son los siguientes:

- El periodo de calentamiento.
- La expansión y el alabeo.
- La resistencia del material a la temperatura de conformado.
- Rango de temperaturas para el conformado.
- Gradiente de temperatura en el espesor del material.

Es necesario no obviar estos factores, es por ello que se debe verificar el tiempo de calentamiento configurado en el proceso, conocer el “coeficiente de expansión térmica

lineal” para determinar el alabeo cuando se calienta el material termoplástico en una máquina de termoconformado. Así también, determinar los límites de temperatura en que el material puede ser moldeado y no esté siendo dañado térmicamente. Se puede comprobar que existe un daño al producirse un cambio de color en la superficie, un brillo extremo, burbujas, desgarro de la superficie o que el material deje de ser procesable.

Por otro lado, es importante considerar que cada material termoplástico posee un rango de temperaturas en el que puede ser deformado severamente. En este intervalo óptimo de temperaturas es cuando se puede aplicar una fuerza mínima para realizar la conformación. Si con esta fuerza no se consigue realizar el termoformado se tendrá que aplicar más calor sobre la superficie de la preforma con el fin de obtener la definición de detalle requerido (Belmonte, 2012).

## **6.6. Reología de Polímeros**

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia, su objetivo es el estudio del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas; distinguiéndose principalmente la predicción del comportamiento macroscópico del fluido bajo deformaciones y el estudio de forma indirecta de la microestructura del fluido, evaluando el efecto de varios factores sobre dicha microestructura (Pascual, 2016).

Mediante la reología se obtiene información del material sometido, permitiendo la caracterización de la materia, así como la definición de sus parámetros reológicos, tales como viscosidad, consistencia, propiedades elásticas. Por otro lado, permite diseñar equipos sofisticados de procesamiento industrial, conociendo anticipadamente la caracterización de la materia a procesar, así como también bosquejar materiales nuevos con respuestas mecánicas muy específicas y definidas; entre muchas otras acciones (Pascual, 2016).

Se utilizan modelos matemáticos aplicados a la reología de polímeros termoplásticos por dos razones principales: eliminar problemas de procesamiento, como variaciones del espesor de films, inestabilidad dimensional o resistencia pobre de los productos, y para analizar las estructuras moleculares del material. Para determinar las propiedades reológicas de un polímero se usan equipos de medición llamados reómetros, los cuales están diseñados para someter a un material a un esfuerzo, medir cuál es su respuesta y, a partir de esta, calcular dichas propiedades reológicas (Arévalo, 2017).

### 6.6.1. Modelo de Carreau – Yasuda

La reología estudia los fenómenos relacionados con la deformación de los materiales. "Reo" (pew) en griego significa fluir. En general, todos los cuerpos sufren deformaciones, y, por lo tanto, fluyen al ser sometidos a un esfuerzo mecánico. Algunos de estos tipos de deformación son fácilmente perceptibles e identificables, por ejemplo, en el caso de cuerpos en estado líquido o semi-líquido, tales como el agua, la miel, el aceite, etc. La estructura de los polímeros les confiere propiedades reológicas especiales, lo cual hace complejo el análisis y descripción de las mismas (Torres, 2000). Los parámetros del modelo de Carreau -Yasuda correspondientes a la Ec. 1, están ajustados para minimizar el error cuadrático medio de todas las mediciones:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\lambda$  = constante de tiempo que es igual a la inversa de la velocidad de deformación donde tiene lugar la transición entre regiones de viscosidad constante y viscosidad variable.

$n$  = exponente cuya distancia de 1 es proporcional al nivel de adelgazamiento por cizallamiento.

$a$  = parámetro que muchas veces toma el valor numérico de 2, situación que corresponde al modelo de Carreau (Coelho & Pinho, 2015).

### 6.6.2. Modelo de Cross - WLF

Este modelo describe la temperatura, velocidad de cizalla y la dependencia de presión de la viscosidad. El modelo de viscosidad viene dado por la siguiente ecuación (Paltán, 2016):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad \text{Ec. 2}$$

$\eta$ : Viscosidad de masa fundida (Pas)

$\eta_0$ : Deformación viscosa o el "límite Newtoniano" en el que la viscosidad aproxima a una constante a velocidades de cizalla muy bajas.

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

$\tau^*$ : Tensión crítica de nivel en la transición al adelgazamiento de cizalla

$n$ : Índice potencial en el régimen de velocidad de cizalla alta.

## 6.7. Variables del proceso

Existen variables en el proceso de termoformado que pueden afectar la apariencia, calidad, dimensiones y distribución del material en una pieza formada. En pocas palabras afectan las características del producto final. Conocer estas variables puede muchas veces resolver problemas dificultosos de producción en el proceso de termoformado; las variables que se presentan con mayor frecuencia y se presentan como desviaciones en el proceso de termoformado son las siguientes:

Tabla 2: Variables que inciden en el proceso de termoformado.

<b>Variables de la lámina</b>	Espesor
	Orientación
	Temperatura
	Pigmentación
	Tamaño
<b>Variables del molde</b>	Orificios o barrenos de vacío
	Superficie
	Temperatura
	Variables
<b>Variables en el pre-estirado</b>	Caja de vacío
	Temperatura del aire
<b>Variables en las ayudas mecánicas</b>	Forma de la ayuda
	Material
	Temperatura
	Superficie
	Altura
	Velocidad de vacío en la ayuda
	Profundidad de acción
	Variables del material

Fuente: (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

### 6.7.1. Variables de la lámina

#### 6.7.1.1. Espesor

Cuando se utiliza calentamiento por resistencia o por infrarrojos, un cambio en el espesor de la lámina puede provocar un calentamiento desigual, lo que resulta en un cambio en el espesor de la lámina de menos del 8%. Durante el pretensado o la formación profunda, se requieren tolerancias dimensionales estrechas para evitar que el material se rompa en áreas muy delgadas creadas por vacío o presión de aire. En secciones muy profundas existirá una variación del espesor del material, que depende del espesor usado, de la superficie y de la

profundidad máxima de la pieza, en caso de variación del espesor entre chapa y placa, el calentamiento debe reducir la temperatura para evitar el ablandamiento del material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.1.2. Orientación**

La orientación de la lámina, obtenida por mecanizado durante el proceso de extrusión, juega un papel importante en el proceso de conformado por calor. Esta orientación proporciona estabilidad dimensional y mediciones con tolerancias más estrictas, debido a la mínima contracción o expansión del material durante los ciclos de calentamiento y moldeado. Dado que el proceso empleado en la fabricación de la placa es objeto de este documento, esta variable no está presente en la lámina, por lo que no se estudiará en profundidad su efecto sobre la lámina termoformada (Bejarano Arévalo, 2003).

#### **6.7.1.3. Temperatura**

A medida que aumenta la temperatura del material, la resistencia a la tracción se reduce y, por lo tanto, la lámina se vuelve más dúctil. Los mejores resultados en el termoformado se obtienen con formas simples o profundas producidas en el rango de temperatura de recocido más bajo. Las láminas que no se calientan uniformemente tendrán una manera deficiente: la expansión en lugares donde la temperatura es normal será mayor que donde no se ha logrado la suavidad (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.1.4. Pigmentación**

Diferentes pigmentos del mismo material afectan el ciclo de calentamiento y la temperatura de la lámina cuando se usa radiación (resistencia eléctrica) para calentar (Bejarano Arévalo, 2003).

#### **6.7.1.5. Tamaño**

Para una mejor distribución del material en zonas muy profundas, es económico aumentar el tamaño del borde de corte en lugar del grosor del material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

## **6.7.2. Variables de moldes**

### **6.7.2.1. Orificios o barrenos de vacío**

Durante el proceso de vacío, se requiere el tamaño óptimo de los poros de vacío. Teniendo en cuenta que estos afectan la tasa de generación de vacío, determinarán la buena calidad del producto generado por calor. Para un movimiento de aire rápido, se recomienda usar orificios de succión de 1/8" a 1/4" de tamaño.

Es necesario que el tamaño de los agujeros sea lo suficientemente grande para obtener un buen vacío, pero al mismo tiempo no dejar marcas en la pieza final. Los tamaños de orificio recomendados por el *Plastics Engineering Handbook* son de 0.021 in y 0.0135 in (0,53mm-0,34mm) cuando se emplean láminas delgadas y diámetros de 0.035 in y 0.020 in (0,89mm-0,51mm) para láminas de mayor espesor.

Otro factor importante a considerar es la distancia entre los orificios de succión. Cuando se requieren grandes detalles de la geometría del molde, el *Manual de ingeniería de plásticos* recomienda el uso de espacios de hasta 0,25 in (6,35 mm) o donde se pueden usar canales o ventosas, porque tienen más aire en movimiento (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

### **6.7.2.2. Superficie**

Cuando se forma con calor, es fundamental tener en cuenta que el producto final tendrá una apariencia de superficie de molde. El acabado de espejo dará como resultado un acabado brillante en el producto final, pero el acabado mate en la superficie del molde dará como resultado un producto opaco. Si se desean superficies lisas o superficies similares, deben tener al menos tres veces el espesor del material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

### **6.7.2.3. Temperatura**

La temperatura en la superficie del molde afecta directamente la mejor apariencia de la pieza a formar, el tiempo del ciclo de formación y el tamaño de la pieza. La contracción final de una pieza calentada dependerá de la temperatura aproximada de la matriz similar al coeficiente de expansión térmica del material (Bejarano Arévalo, 2003).

## **6.7.3. Variables en el pre-estirado**

### **6.7.3.1. Caja de vacío**

En un vacío de formación libre y de reflujo, es muy eficaz utilizar una caja de vacío de 8 a 12 cm. más largo que la profundidad total de la burbuja formada para evitar el enfriamiento rápido en la circunferencia de la placa con la matriz. Antes de que se formen burbujas, la



lámina debe adherirse firmemente al molde. En un vacío de trabajo nuevamente, la delgadez máxima estará en el fondo de la burbuja que se ha formado. Para lograr paredes más gruesas, se requiere un borde de dos pasos en la caja de vacío que enfriará el área superior y creará un espesor más grueso (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.3.2. Temperatura del aire**

Normalmente, el aire del sistema se precalienta; La temperatura del aire en el ambiente que ingresa al sistema puede enfriar la lámina, afectando el tamaño y la forma de la pieza. En materiales delgados, el problema de enfriamiento es más severo. Con el aire precalentado, la temperatura debe ser unos 10° inferiores a la temperatura de las aspas. Se debe instalar un deflector o difusor de aire en la entrada del molde, ya que esto puede evitar el enfriamiento repentino de algunas áreas del material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4. Variables en las ayudas mecánicas**

##### **6.7.4.1. Forma de la ayuda**

El soporte debe ajustarse muy de cerca a la forma de la cavidad del molde, pero debe ser un 10 a 20% más pequeño en longitud y anchura (o diámetro). Cuando estas medidas son de 12cm o más grande, el pequeño soporte deberá dejar un espacio libre de al menos 1/4" entre el terminal y el soporte, para evitar en lo posible, irregularidades en el espesor del material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

##### **6.7.4.2. Material**

Para obtener buenos resultados, el fundente mecánico debe tener excelentes cualidades de transferencia de calor y ser resistente a altas temperaturas continuas y prolongadas. El aluminio es uno de los mejores. Para materiales pequeños o prototipos, es preferible la madera dura y para evitar que la madera se seque o agriete debido al calor, la superficie debe aceitarse regularmente (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

##### **6.7.4.3. Temperatura**

La temperatura de la superficie debe mantenerse justo por debajo de la temperatura de formación de la lámina. Es posible que tenga una temperatura de trabajo baja en la ayuda, pero si la temperatura baja, las marcas de enfriamiento serán más visibles (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

Así como el control estricto de la temperatura del molde no es tan importante, en el los soportes deben mantener una temperatura máxima uniforme de 10 °C sin variación. Con un control de temperatura adecuado, las manchas de moho generalmente se eliminan por completo (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4.4. Superficie**

Una superficie lisa con radios bien pulidos, libre de polvo y escombros producirá buenas piezas (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4.5. Altura**

Una herramienta de soporte mecánico efectiva es aquella que es más larga que la profundidad de la cavidad en el molde, ya que esto le permitirá ajustar su ajuste (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4.6. Velocidad de vacío en la ayuda**

La mayor velocidad del refrigerante aumenta la capacidad de comprimir aire en la cavidad del molde. La capacidad del sistema de vacío y su tiempo relativo a la carrera de soporte afectan la presión en la cavidad del molde. Normalmente, el vacío en el ciclo deberá empezar al mismo tiempo en que la ayuda toca el material (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4.7. Profundidad de acción**

Los mejores resultados se obtienen cuando la penetración del portaherramientas es de 70 u 80° con respecto a la cavidad. Esta relación da como resultado la mejor combinación de espesor en la parte inferior y la pared de la pieza (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

#### **6.7.4.8. Variables del material**

El tipo de material plástico utilizado afectará la cantidad de presión requerida para mantener un contacto adecuado del material alrededor del ayudante. Los materiales de alta resistencia, como el acrílico y el ABS, requieren una presión de aire de 15 a 50 Psi (Plastiglas de México, S.A, s. f.).

### **6.8. Método de elementos finitos**

El método de elementos finitos también conocido por sus siglas en inglés FEM está basado en el proceso de descomposición del sistema analizado en pequeños subsistemas cuyo

modelado sea más sencillo, para luego ensamblar resultados parciales y obtener el comportamiento global. Es así que se podría considerar el al FEM como la fragmentación de un continuo en un conjunto de elementos conectados entre sí por una serie de puntos que reciben el nombre de nodos.

En el FEM el continuo es dividido por puntos, líneas o superficies imaginarias, obteniendo así formas geométricas sencillas. En el caso lineal el dominio el dividido por puntos, en el caso bidimensional por líneas y en el caso tridimensional por superficies (Martínez & Patiño, 2015).

### 6.8.1. Modelo integral KBKZ

El modelo KBKZ es el modelo viscoelástico integral que es muy adecuado para deformaciones finitas. Los modelos viscoelásticos integrales se usan comúnmente para análisis experimentales debido a su complejidad (estos modelos proporcionan una descripción cuantitativa y cualitativa más precisa del comportamiento viscoelástico de los polímeros) Para aplicaciones prácticas, los modelos viscoelásticos diferenciales son más precisos. El modelo KBKZ se presenta en la Ec. 3 y contiene 3 partes cruciales: la función de memoria  $m(t - t')$ , la función de amortiguamiento  $h(I_1, I_2)$  y los tensores de Cauchy-Green  $C^{-1}(t')$ , (Zingoni, 2016).

$$\tau = \int_{-\infty}^t m(t - t')h(I_1, I_2)C^{-1}(t')dt' \quad \text{Ec. 3}$$

La función de memoria se puede encontrar a partir de datos de pequeña deformación según la teoría viscoelástica lineal; generalmente se da como una suma de funciones exponenciales que involucran los tiempos y los módulos de relajación para n modos de relajación. El número de modos depende del polímero fundido, pero normalmente entre 4 y 8 modos son suficientes para capturar los datos viscoelásticos lineales, mientras que para las soluciones de polímeros son suficientes menos modos (2 a 3). Por otra partes la función de amortiguamiento no es una función única y se han propuesto muchas funciones similares para hacer coincidir los datos experimentales (Mitsoulis, 2013).

### 6.8.2. Tipos de elementos finitos:

En 2D son figuras geométricas de cualquier número de lados, por facilidad se usan triángulos y cuadriláteros como se muestran en la (Figura 5).

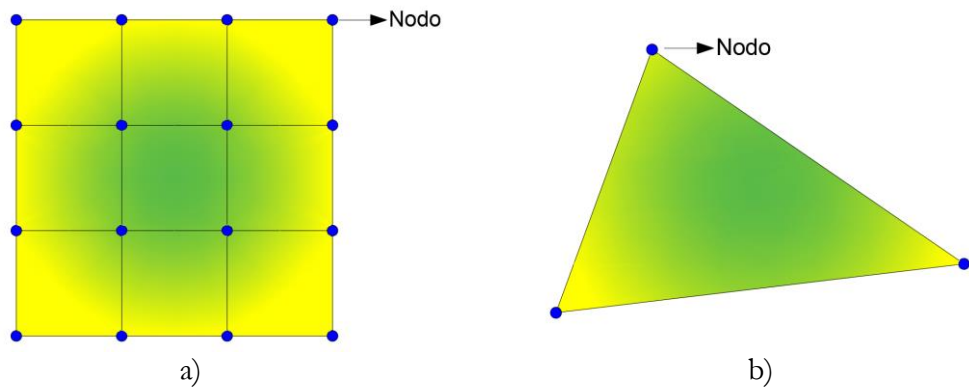


Figura 5: Elemento finito bidimensional.

a) cuadrilátero b) triangular

Fuente: (Martínez & Patiño, 2015).

En 3D los elementos finitos son poliedros de cualquier número de caras, los más utilizados son tetraedros y hexágonos, los cuales se muestran en la (Figura 6).

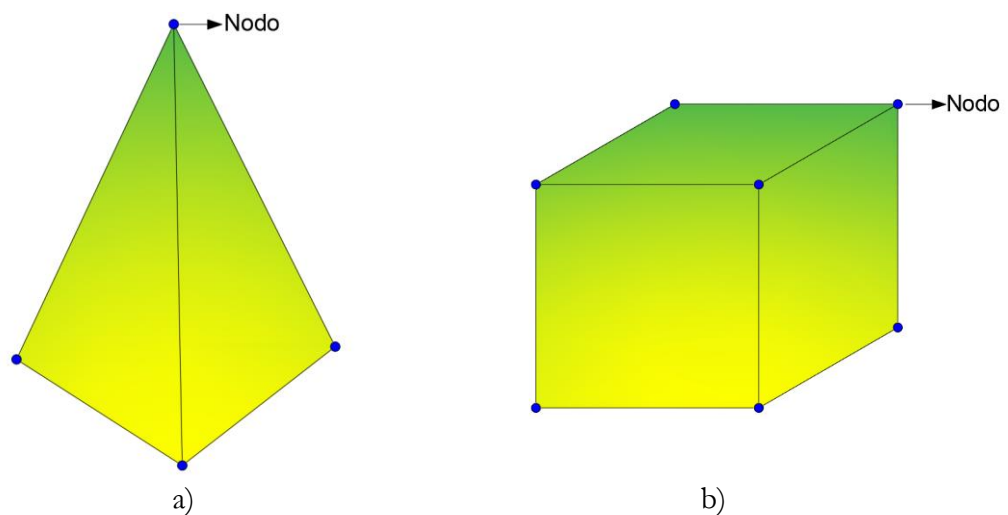


Figura 6: Elemento finito tridimensional.

a) Tetraedro. b) Hexaedro regular

Fuente: (Martínez & Patiño, 2015).

Existen elementos que son incorrectos o son muy pobres, como los que se muestran en la (Figura 7) por lo tanto, no deben ser escogidos, ya que proporcionan una solución incorrecta o simplemente no proporcionan solución.

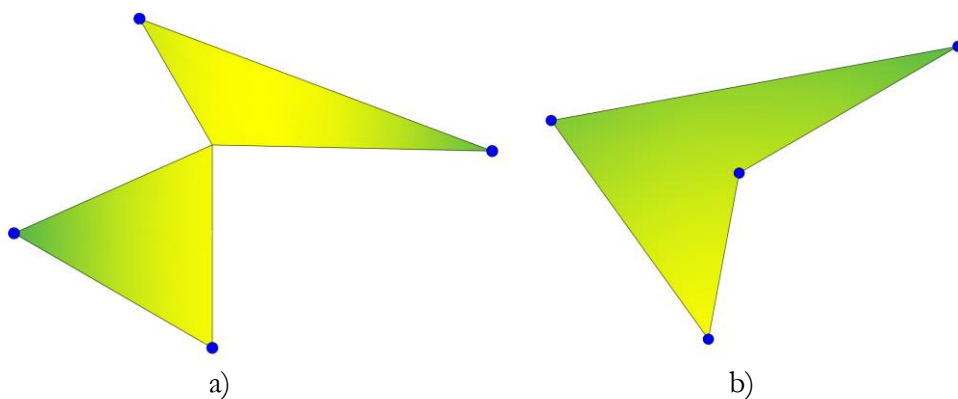


Figura 7: Elementos incorrectos  
Fuente: (Martínez & Patiño, 2015).

## 6.9. Método de elementos geométricos

En adelante nombraremos a este método con las siglas MEG. Las láminas de polímero planas se pueden deformar en formas bastante profundas mediante una variedad de métodos de formación específicos que se conocen como termoformado. En todos estos métodos, la hoja se mantiene en su lugar sujetándola y se ablanda mediante calentamiento; este material ablandado se forma en un molde, que puede ser una cavidad hembra o un molde macho, por presión atmosférica contra un vacío (formación de vacío) o una ligera presión de aire (formación de presión). Al entrar en contacto con el molde frío, el material ablandado se congela, por lo que se obtiene un perfil de espesor, ya que la hoja blanda entra en contacto con el molde en diferentes momentos (Rosenzweig et al., 1979).

Schmidt & Carley (1975), en una de sus publicaciones describen la memoria plástica donde las burbujas sopladas vuelven completamente a su forma original de hoja plana, ya sea liberando repentinamente la presión de formación o recociendo las burbujas esferoidales a una temperatura adecuada. Esta recuperación completa los ha llevado a concluir que un comportamiento similar al elástico se puede atribuir al proceso de soplado de láminas de plástico blando. En un proceso de este tipo, todo el trabajo de deformación se almacena sin disipación viscosa, lo que puede ser cierto a altas tasas de deformación mucho más breves que los tiempos de relajación característicos de la hoja conformada. En tales sistemas, la temperatura de formación tendría un efecto menor en la distribución del espesor. Sin embargo, la temperatura de formación es un parámetro importante que afecta al pandeo y la capacidad de estiramiento de las láminas de plástico (Rosenzweig et al., 1979).

Las ecuaciones que a continuación se presenta son producto de investigación de (Rosenzweig et al., 1979) de las cuales en años posteriores se han referenciado trabajos encaminados a la predicción de espesor de pared de termoformado, entre ellos los trabajos de investigación de (Kutz, 2002) y (Crawford, 1998); (Wooldridge, 1985) realizó una corrección de las ecuaciones para molde truncado poco profundo.

### 6.9.1. Molde cónico

Considere formar una lámina de plástico, originalmente con un grosor  $\delta_0$ , en un molde cónico en un momento determinado como se muestra en la (Figura 8). En este

momento, la burbuja libre está en contacto con el molde a la altura  $Z \sin \beta$  tiene una forma esférica de radio  $R$  el cual se indica en la Ec. 4 está determinado por la geometría del molde y la posición de la burbuja y viene dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{H - Z \sin \beta}{\sin \beta \tan \beta} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

**$R$**  : Radio de la burbuja libre

**$H$**  : Altura del cono

**$Z$**  : Distancia de la pared donde la burbuja es tangente

**$\beta$**  : Ángulo comprendido entre la boca y pared del cono.

Mediante la Ec. 5 es posible obtener el área de la superficie de burbuja esférica libre.

$$A = 2\pi R^2(1 - \cos \beta) \quad \text{Ec. 5}$$

La distribución del espesor de la pared se obtiene haciendo un balance diferencial de volumen, conforme se expone en la Ec. 3. Donde  $\delta$  es el espesor en  $Z$ .

*(Volumen de cáscara de burbuja libre a partir de  $Z$ )*

$$= (\text{Volumen de cáscara de burbuja libre a partir de } Z + \Delta Z) \\ + (\text{Volumen de anillo congelado depositado de } Z \text{ a } Z + \Delta Z)$$

$$2\pi R^2(1 - \cos \beta)\delta|_Z = 2\pi R^2(1 - \cos \beta)\delta|_{Z+\Delta Z} + 2\pi r\delta\Delta Z \quad \text{Ec. 6}$$

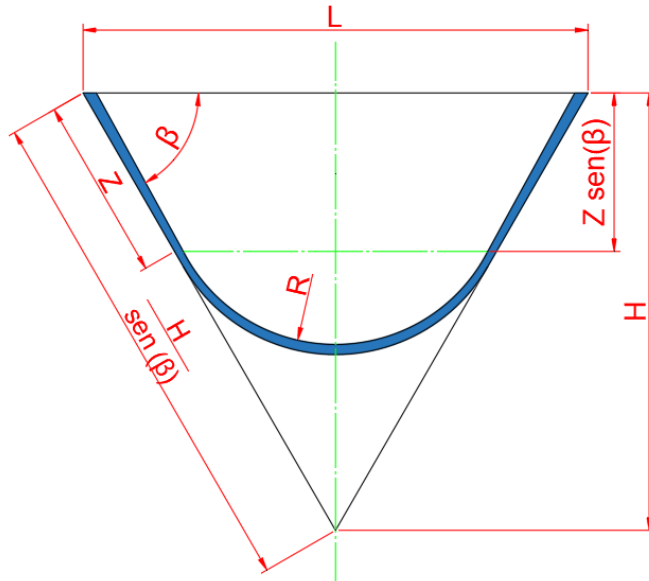


Figura 8: Detalles de una cavidad cónica.

Fuente: (Rosenzweig et al., 1979).

La ecuación diferencial resultante para  $\delta$ , después de sustituir  $r = R \sin \beta$  y reorganizar es:

$$\frac{d\delta}{\delta} = \left(2 - \frac{\tan \beta \sin \beta}{1 - \cos \beta}\right) \sin \beta \left(\frac{dZ}{H - Z \sin \beta}\right) \quad \text{Ec. 7}$$

La integración de la Ec. 7 con la condición inicial  $\delta = \delta_I$  donde  $\delta_I$  es el espesor inicial de la burbuja tangente al cono en  $Z = 0$  da como resultado la Ec. 8:

$$\delta = \delta_I \left(\frac{H - Z \sin \beta}{H}\right)^{\sec \beta - 1} \quad \text{Ec. 8}$$

Finalmente, el espesor inicial  $\delta_I$  se puede relacionar con el espesor original de la preforma  $\delta_0$ , con Ec. 5 donde  $R = \frac{L}{2 \sin \beta}$ ; la relación se puede observar en la Ec. 9.

$$\frac{\pi L^2 \delta_0}{4} = \frac{\pi L^2 (1 - \cos \beta) \delta_I}{2 \sin^2 \beta} \quad \text{Ec. 9}$$

Simplificando y despejando  $\delta_I$  se obtiene la Ec. 10.

$$\delta_I = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \delta_0 \quad \text{Ec. 10}$$

La Ec. 11 para la distribución de espesores se obtiene sustituyendo la Ec. 10 en Ec. 8.

$$\delta = \delta_I \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \left(\frac{H - Z \sin \beta}{H}\right)^{\sec \beta - 1} \quad \text{Ec. 11}$$

### 6.9.2. Formación de moldes cónicos truncados

Los moldes truncados representan dos casos diferentes, a saber, moldes profundos y poco profundos como se muestra en la (Figura 9 y Figura 10) respectivamente. En un molde profundo, la burbuja libre se congela gradualmente en las paredes a lo largo de  $Z$  dando un perfil de espesor que obedece a Ec. 11. Este proceso continúa hasta  $Z = Z_T$ , momento en el que la burbuja libre entra en contacto con el fondo del molde como se indica en la (Figura 9). Desde este punto ( $Z > Z_T$ ) la burbuja libre avanza hacia la esquina del molde cubriendo simultáneamente el techo y la pared. En un molde poco profundo, la burbuja libre toca

inicialmente el techo del molde. Tras un mayor avance de la burbuja, el techo del molde se cubre hasta que  $X = X_T$  como se muestra en la (Figura 10). En este punto, la burbuja libre se vuelve tangencial también a la pared del molde. Desde este punto ( $X > X_T$ ) la burbuja libre avanza hacia la esquina del molde cubriendo simultáneamente el techo y la pared (Rosenzweig et al., 1979).

La distinción entre moldes cónicos truncados profundos y superficiales depende por tanto de, si la burbuja libre comienza a cubrir inicialmente la pared o el techo del molde.

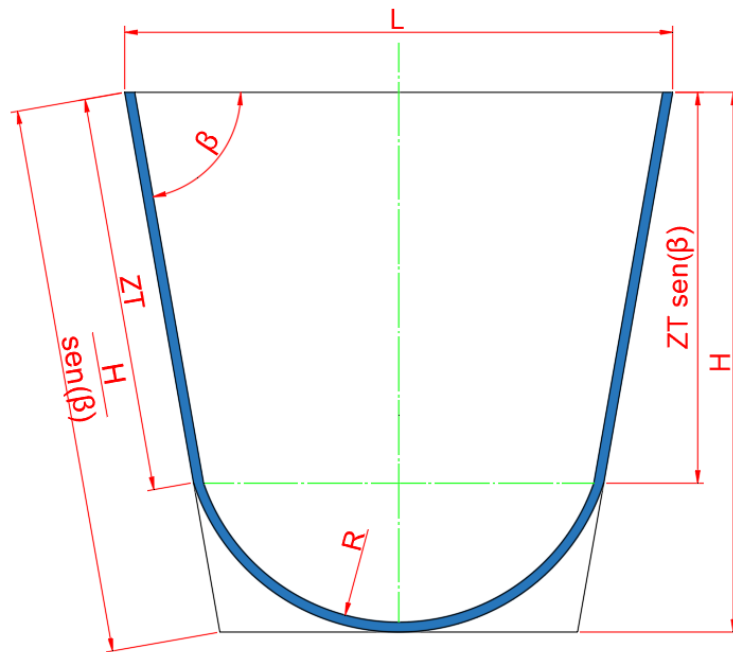


Figura 9: Detalles de un molde cónico truncado profundo; posición de la burbuja en  $Z = Z_T$   
Fuente: (Rosenzweig et al., 1979).

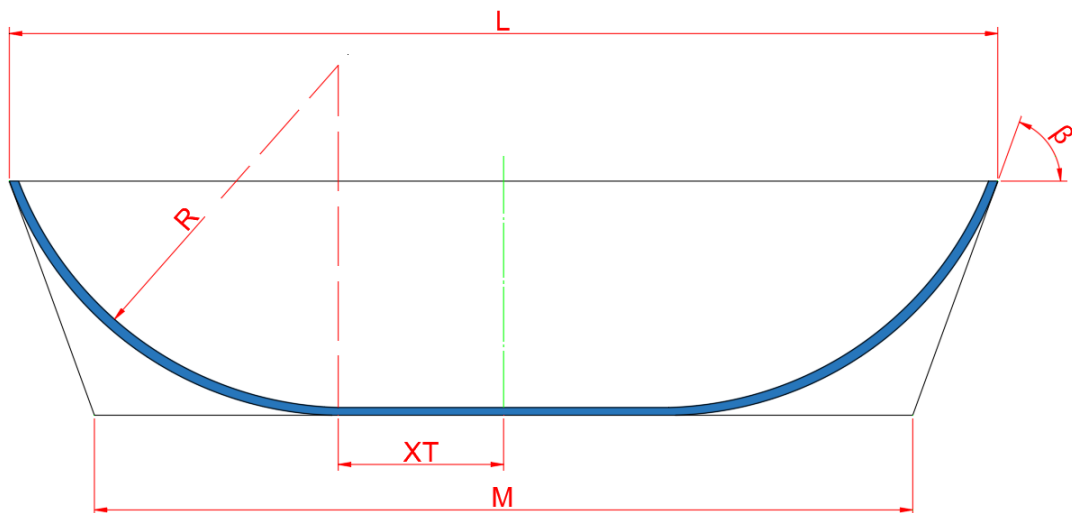


Figura 10: Detalles de un molde cónico truncado poco profundo; posición de la burbuja en  $X = X_T$ .

Fuente: (Rosenzweig et al., 1979).



Mediante la Ec. 12 se puede comprobar si un molde cónico truncado se define como molde profundo:

$$H > \left(\frac{L}{2}\right) \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta} \quad \text{Ec. 12}$$

Mientras que un molde cónico truncado poco profundo se define mediante la Ec. 13.

$$H < \left(\frac{L}{2}\right) \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta} \quad \text{Ec. 13}$$

Mediante balances de volumen adecuados, se pueden derivar ecuaciones que describen perfiles de espesor de productos cónicos truncados. En los siguientes párrafos se ofrece un resumen de las ecuaciones que se desarrollaron.

## 6.10. Perfiles de distribución de espesor

### 6.10.1. En moldes cónicos truncados profundos

El perfil de espesor en la pared del molde en el rango  $0 \leq Z \leq Z_T$  viene dado por Ec. 8 donde  $Z_T$  se obtiene mediante la Ec. 14 y representa la distancia que ha recorrido la burbuja hasta tocar por primera instancia el fondo del molde (Rosenzweig et al., 1979).

$$Z_T = \frac{H(1 + \cos \beta)}{\sin \beta} - \frac{L}{2} \quad \text{Ec. 14}$$

En la gama  $Z_T \leq Z \leq \frac{H}{\sin \beta}$  un balance de masa diferencial considerando simultáneamente los anillos de congelación en la pared y en el techo da por integración la Ec. 15.

$$\delta = \delta_1 \frac{S_I}{SF_Z} \quad Z_T \leq Z \leq \frac{H}{\sin \beta} \quad \text{Ec. 15}$$

Los perfiles de espesor en el techo (comenzando en el centro del techo y moviéndose hacia la pared) y en la pared (comenzando en  $Z$  y moviéndose hacia el techo a lo largo de la inclinación) son simétricos, por lo que se expresan igualmente por la Ec. 15  $\delta = \delta_1 \frac{S_I}{SF_Z} \quad Z_T \leq Z \leq \frac{H}{\sin \beta}$ . Esta ecuación relaciona el espesor  $\delta$  en un punto para liberar

la superficie de la burbuja  $S$  comenzando en el mismo punto.  $S$  está dado por Ec. 16 (Rosenzweig et al., 1979).

$$S = \frac{2\pi}{1 - \cos \beta} (H - Z \sin \beta) [(Z - Z_T)\beta + (H + Z \sin \beta)] \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $Z_T \leq Z \leq \frac{H}{\sin \beta}$ ,  $\delta_I$  y  $S_I$  son valores iniciales de espesor y superficie de la burbuja libre comenzando en  $Z_T$  y están representados por la Ec. 17 y Ec. 18 respectivamente (Rosenzweig et al., 1979).

$$\delta_I = \delta_o \frac{1 + \cos \beta}{2} \left( \frac{H - Z_T \sin \beta}{H} \right)^{\sec \beta - 1} \quad \text{Ec. 17}$$

Y

$$S_I = 2\pi(1 + \cos \beta) \left( \frac{H}{\sin \beta} - Z_T \right)^2 \quad \text{Ec. 18}$$

$F_Z$  en la Ec. 15 es una expresión algebraica complicada dada en detalle en el Apéndice 1.

### 6.10.2. En moldes cónicos truncados poco profundos

El perfil de espesor en el techo del molde en el rango  $0 \leq X \leq X_T$  se encuentra mediante la integración de un balance de volumen diferencial que da como resultado la Ec. 19:

$$\delta = \delta_I \frac{S_I}{SF'_X} \quad 0 \leq X \leq X_T \quad \text{Ec. 19}$$

Donde  $X_T$  está definido por la Ec. 20 y representa la distancia en el fondo del molde hasta que la burbuja entra en contacto con la pared.

$$X_T = \frac{L}{2} - \frac{H(1 + \cos \beta)}{\sin \beta} \quad \text{Ec. 20}$$

$S$  se puede obtener mediante la Ec. 21 y es la superficie libre de la burbuja luego que entro en contacto con el fondo.

$$S = 2\pi R \left\{ X \left[ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left( 1 - \frac{H}{R} \right) \right] + H \right\} \quad \text{Ec. 21}$$

$\delta_I$  y  $S_I$  están definidas por la Ec. 22 y Ec. 23 respectivamente y son el espesor y la superficie de la burbuja libre tras el contacto inicial con el centro del techo.

$$\delta_I = \delta_0 \frac{L^2}{L^2 + 4H^2} \quad \text{Ec. 22}$$

$$S_I = 2\pi H R_{X=0} \quad \text{Ec. 23}$$

El radio R se obtiene mediante la Ec. 24 y es el radio de la burbuja libre a diferentes avances de X.

$$R = \frac{1}{2H} \left[ \left( \frac{H}{\sin \beta} \right)^2 + \left( \frac{L}{2} - \frac{H}{\tan \beta} - X \right)^2 + \frac{2H}{\tan \beta} \left( \frac{L}{2} - \frac{H}{\tan \beta} - X \right) \right] \quad \text{Ec. 24}$$

Mediante la integral de la Ec. 25 se puede definir el valor de  $F_x$

$$F_x = \exp \left( 2\pi \int_0^x \frac{X}{S} dX \right) \quad \text{Ec. 25}$$

Se obtienen perfiles de espesor simétrico en el fondo y pared mediante la Ec. 26, para  $X \geq X_T$

$$\delta = \delta_I \frac{S_I}{S F_x} \quad X_T \leq X \leq \frac{M}{2} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde S es la superficie libre de la burbuja determinada por Ec. 27, para los rangos de  $X_T \leq X \leq M/2$

$$S = 2\pi R \left[ X\beta + \left( \frac{L}{2} - \frac{H}{\tan \beta} - X \right) \sin \beta \right] \quad \text{Ec. 27}$$

$\delta_I$  y  $S_I$  son el espesor y la superficie de la burbuja libre al contacto inicial con la pared y en  $X = X_T$ .  $\delta_I$  se calcula sustituyendo  $X = X_T$  en la Ec. 15  $S_I$  está dado por la Ec. 28:

$$S_I = \frac{2\pi H}{1 - \cos \beta} (X_T \beta + H) \quad \text{Ec. 28}$$

$F_x$  in Ec. 22 tiene una forma complicada y se detalla en el Apéndice 2.

## 7. Metodología.

La investigación que se lleva a efecto en este documento es de tipo experimental debido a que manipularemos las variables de presión, temperatura, material y tiempo en el proceso de termoformado de manera analítica, experimental y mediante el FEM, para predecir el espesor de pared de 2 piezas obtenidas mediante el proceso antes mencionado, cada una se analizará en un caso de estudio diferente:

- Caso 1: Termoformado de un vaso cónico.
- Caso 2: Termoformado de una carcasa de lámpara.

El análisis se realizará mediante 5 etapas las cuales se indican en la (Figura 11); para el caso 1 filtraremos los datos obtenidos por otra investigación con el fin de comparar los resultados obtenidos en esta tesis. En el caso 2 realizaremos un proceso experimental, luego modelaremos el mismo proceso de manera analítica y mediante FEM; finalmente se analizan los resultados obtenidos y se compara la eficiencia de cada método.

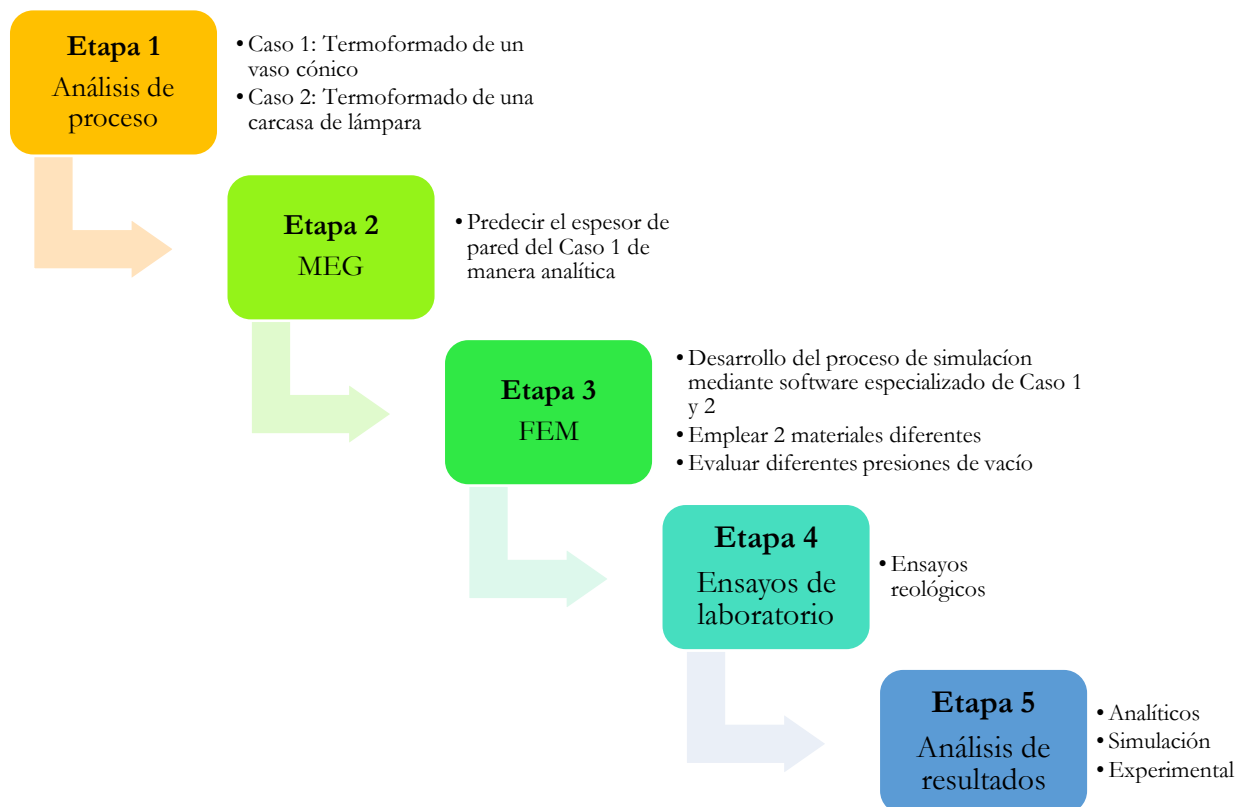


Figura 11: Etapas del análisis de este estudio.  
Fuente: Autor.

## 7.1. Análisis del proceso

### 7.1.1. Termoformado de un vaso cónico

A continuación, se expone el caso de estudio hecho por (Selcuk & Olcay, 2013) en donde se obtiene el espesor de pared para un vaso cónico termoformado, mediante MEG, FEM y de manera experimental, obteniendo los mejores resultados por AEG; las medidas del molde se indican en la (Figura 12); el polímero empleado es HIPS laminado de 2 mm de espesor. Para el FEM analizaron un cuarto de la geometría real del molde negativo y preforma, debido a que la pieza es simétrica en sus 2 ejes principales, el software empleado es Ls-Dyna™ y las dimensiones de la lámina empleada es de 30 cm x 30 cm.

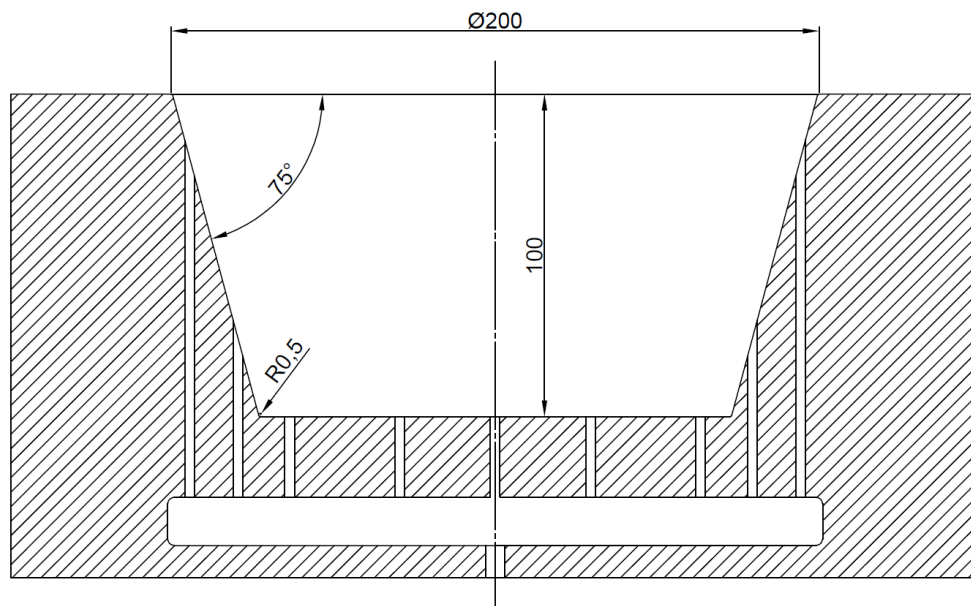


Figura 12: Medidas del molde cónico truncado.  
Fuente: Autor

Con los datos expuestos anteriormente se procederán las siguientes actividades:

- En la segunda etapa de esta investigación se obtendrán los espesores de pared mediante el MEG, ocupando las ecuaciones revisadas en el capítulo anterior.
- En la tercera etapa se obtendrán los espesores de pared mediante FEM, se empleará los polímeros HIPS y LDPE; adicionalmente ocuparán 2 presiones diferentes con el uso del material HIPS, a fin de evaluar la distribución de espesores a diferentes presiones de vacío.
- En la cuarta etapa se indicará el ensayo reológico realizado al polímero HIPS el cual tiene como fin obtener datos para cargarlos en el software especializado.

- En la quinta etapa se ejecutará la validación de datos obtenidos mediante los 2 métodos.

### 7.1.2. Termoformado de una carcasa de lámpara.

A continuación, se presenta el termoformado de una carcasa primaria para lámpara de sala elaborada en material ABS de 2 mm de espesor la cual se indica en la (Figura 13); para este caso de análisis el material empleado será HIPS laminado, color blanco de 2 mm de espesor.

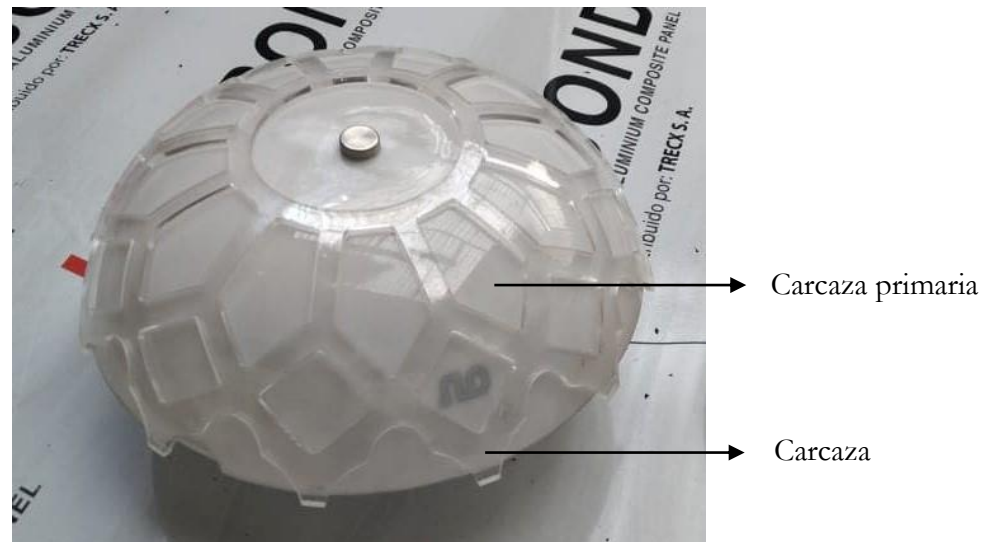


Figura 13: Lámpara de sala elaborada en material ABS.  
Fuente: Autor.

La máquina usada para el proceso fue construida artesanalmente y sus partes se indican en la (Figura 14), la estación de vacío se conforma por una placa de madera con orificios de vacío de 1/8 de diámetro, la bomba de succión alcanza una presión negativa de hasta 0.9kPa.; las mordazas o pinzas de sujeción esta constituidas por dos marcos de tubo cuadrado colocados uno sobre otro, la preforma va colocada en medio de los dos marcos, y la estación de calentamiento está elaborada por 4 niquelinas tipo resistencia que van sobre una cama de ladrillos refractarios.



a)



b)

Figura 14: Máquina termoformadora con presión de vacío negativa.

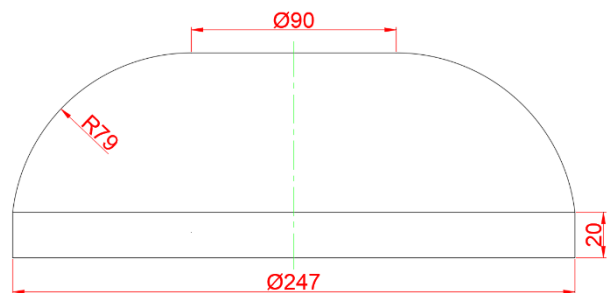
a) Máquina termoformadora. y b) Estación de calentamiento.

Fuente: Autor.

El molde positivo está elaborado de madera y sus medidas se indican en la (Figura 15) es macizo en su interior y no contiene orificios de vacío, por lo que la presión negativa solo se generara desde la placa de vacío.



a)



b)

Figura 15: Molde positivo empleado para el termoformado.

a) Molde de madera. b) Medidas del molde.

Fuente: Autor.

El proceso inicia con la preparación del material, se recorta la lámina de 50 cm x 50 cm, para este caso de estudio hemos trazado una malla de elementos cuadrados de 5cmx5cm en los lados, y en el centro de 2.5 cm x 2.5 cm como se indica en la (Figura 16) para luego evaluar la deformación de la lámina.

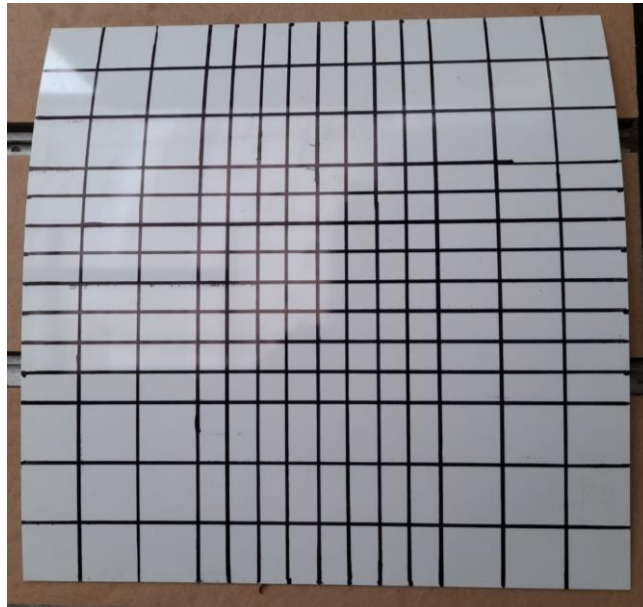


Figura 16: Preparación de la lámina de PSPI.

Fuente: Autor

Antes de realizar el termoformado se debe precalentar la zona de calentamiento por 5 minutos, esto ayudará al momento de calentar la lámina obtener una zona de calentamiento homogénea; se coloca la lámina sobre la estación de calentamiento como se indica en la (Figura 17) y se deja por 33 segundos.



a)

b)

Figura 17: Calentamiento de la lámina de HIPS.

a) Precalentamiento de la estación de calentamiento. b) Calentamiento de la lámina a los 12seg.

Fuente: Autor.

Para revisar la temperatura a la que llega la lámina se tomó una foto térmica con un grado de emisividad de 0.94 (valor recomendado para superficies de plástico) justo a los 33 segundos de haber calentado la lámina de PSPI, de esta manera se puede obtener la temperatura del material a la que se actúa el proceso y posteriormente realizar un ensayo reológico del PSPI a esta temperatura. En la (Figura 18) se observa que la superficie del



material no tiene una temperatura constante, por lo que se calculó la temperatura media de la superficie caliente, siendo esta 155 °C.

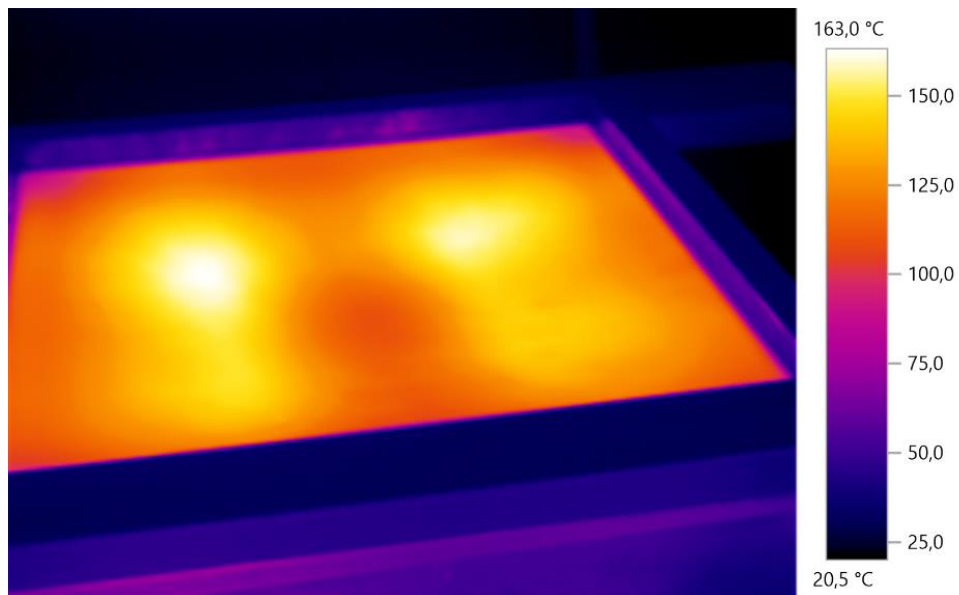


Figura 18: Foto térmica captada a los 33 segundos de calentamiento.  
Fuente: Autor.

Finalmente, se gira las pinzas de sujeción de modo que la lámina cubra el molde positivo mientras se genera un vacío desde la base de madera, se deja por aproximadamente 33 segundos para que la pieza termoformada se enfríe hasta el punto de poderla manipular como se indica en la (Figura 19).



Figura 19: Pieza termoformada  
Fuente: Autor.

Revisando la malla dibujada en una cara de la lámina se puede observar que en la parte alta donde el material entro en contacto por primera vez y que además es una superficie horizontal no existe deformación, esto se ha comprobado midiendo las cuadrículas y verificando que no presentan variación en su medida; en la parte circular de contacto las cuadrículas presentan un alargamiento de hasta 3.5 mm y esto se puede apreciar en la (Figura 20).

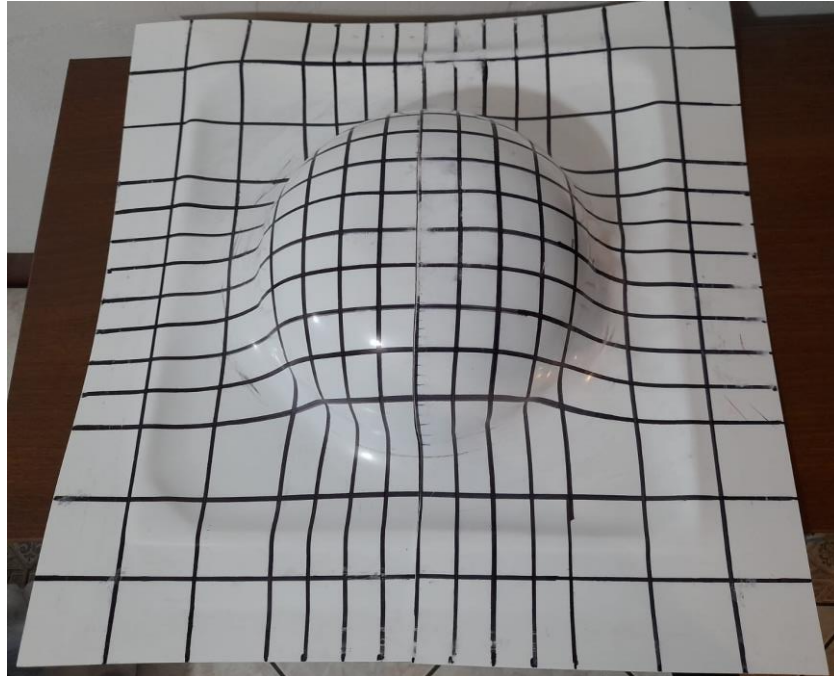


Figura 20: Resultados experimentales de la deformación de malla.

Fuente: Autor.

Realizando un corte a la pieza termoformada la cual se indica en la (Figura 21) se observa que, en el lado derecho, la presión negativa estiro el material hasta la placa de vacío, mientras que en el lado izquierdo la presión fue menor, dejando un espacio de 6 mm entre la superficie de la pieza y la placa de vacío, por esta razón existe diferencia entre los espesores de las zonas que están marcadas con rojo.



Figura 21: Corte realizado a la pieza termoformada.

Fuente: Autor.

Con los datos mencionados anteriormente se procederán las siguientes actividades:

- En la tercera etapa de esta investigación se obtendrá los espesores de pared mediante FEM
- En la cuarta etapa se indicará el ensayo reológico aplicado al HIPS en su temperatura de termoformado, esto con el fin de cargar los datos en el software especializado.
- En la quinta etapa se realizará la validación de datos entre los experimentales y los obtenidos por el FEM.

## **7.2. Análisis de elementos geométricos**

En esta sección se obtiene el espesor de pared solo para el caso 1, debido a que su geometría es de un molde cónico truncado. Con el uso de las ecuaciones mencionadas en la sección anterior. Se realizó un Script con la ayuda del programa MATLAB el cual se expone en el anexo 1, en el cual se necesita ingresar 3 parámetros fundamentales:

- Espesor inicial de la lámina [mm]
- Profundidad del molde [mm]
- Diámetro mayor del molde [mm]
- Ángulo entre el diámetro mayor y la pared del molde [°]

El algoritmo inicialmente identifica el tipo de molde, profundo o poco profundo, luego aplica las ecuaciones para predecir el espesor de pared y finalmente grafica los resultados. Para la lectura de resultados es importante mencionar que existen 2 instantes importantes en el termoformado del caso 1.

El instante 1 se puede observar en la (Figura 22) en el cual se indica el avance de la burbuja de polímero desde que inicia el proceso de termoformado hasta que entra en contacto con el fondo del molde; aquí el único recorrido que realiza el material es solo por la pared del molde, 30,32 mm exactamente; para predecir el espesor de pared hasta este instante se empleó la Ec. 19.

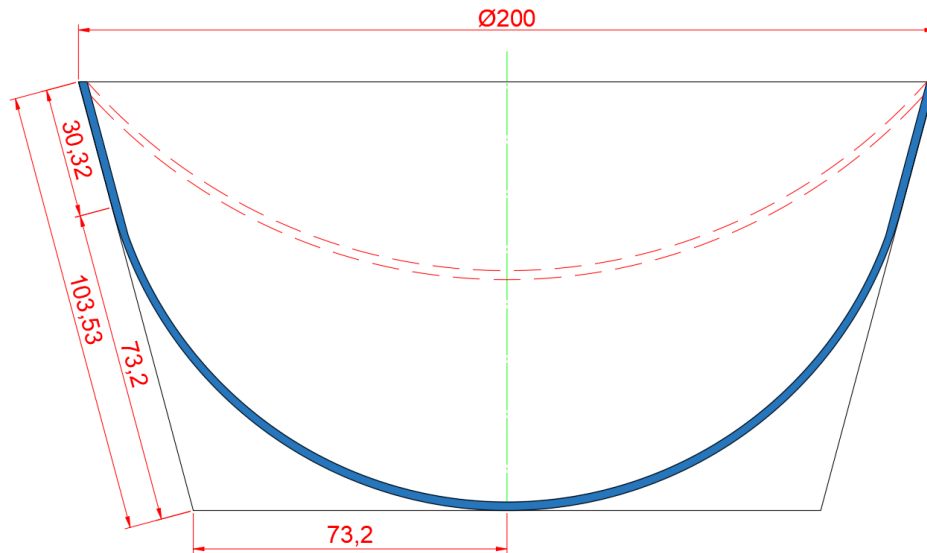


Figura 22: Momento que el polímero HIPS entra en contacto con el fondo del molde.  
Fuente: Autor.

El instante 2 se muestra en la (Figura 23) y este indica el avance desde que el material entra en contacto con el fondo del molde hasta llegar a la arista o esquina del fondo, donde termina el proceso de deformación de la lámina; aquí el material recorre la pared y fondo del molde al mismo instante, 73,2 mm exactamente por cada lado, es por ello que en la distribución de espesores debe existir simetría para estas dos partes de la mitad del vaso.

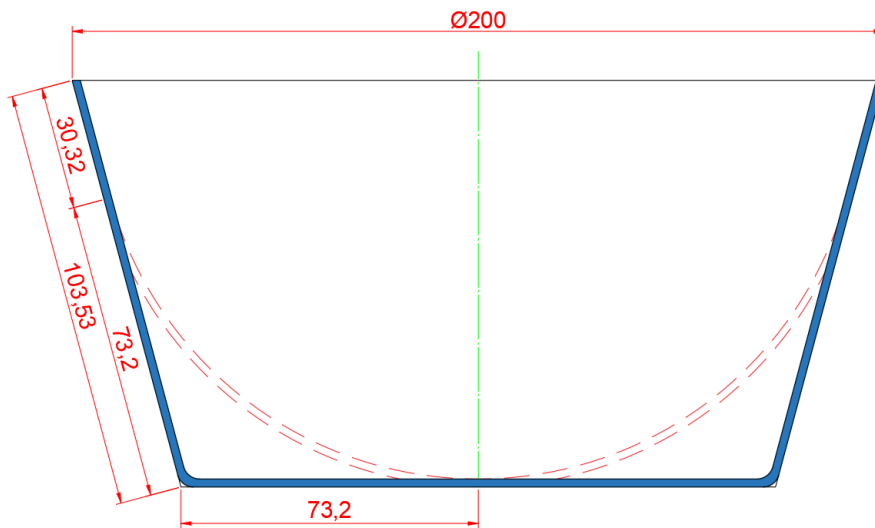


Figura 23: Momento que el PSAI llega a la arista del fondo.  
Fuente: Autor.

Según lo explicado anteriormente, se presenta la (Figura 25) en donde se indica los puntos principales de medición del vaso termoformado, y la manera como se proyectan sobre el eje de las abscisas de cada plano; debido a que el vaso es simétrico en sus 2 ejes principales, se presenta el perfil de espesores de la cuarta parte del vaso; la ubicación de cada punto llamaremos:

① Diámetro mayor

② Esquina

③ Fondo

La distancia entre ① y ② llamaremos pared del vaso y la distancia entre ② y ③ fondo del vaso.

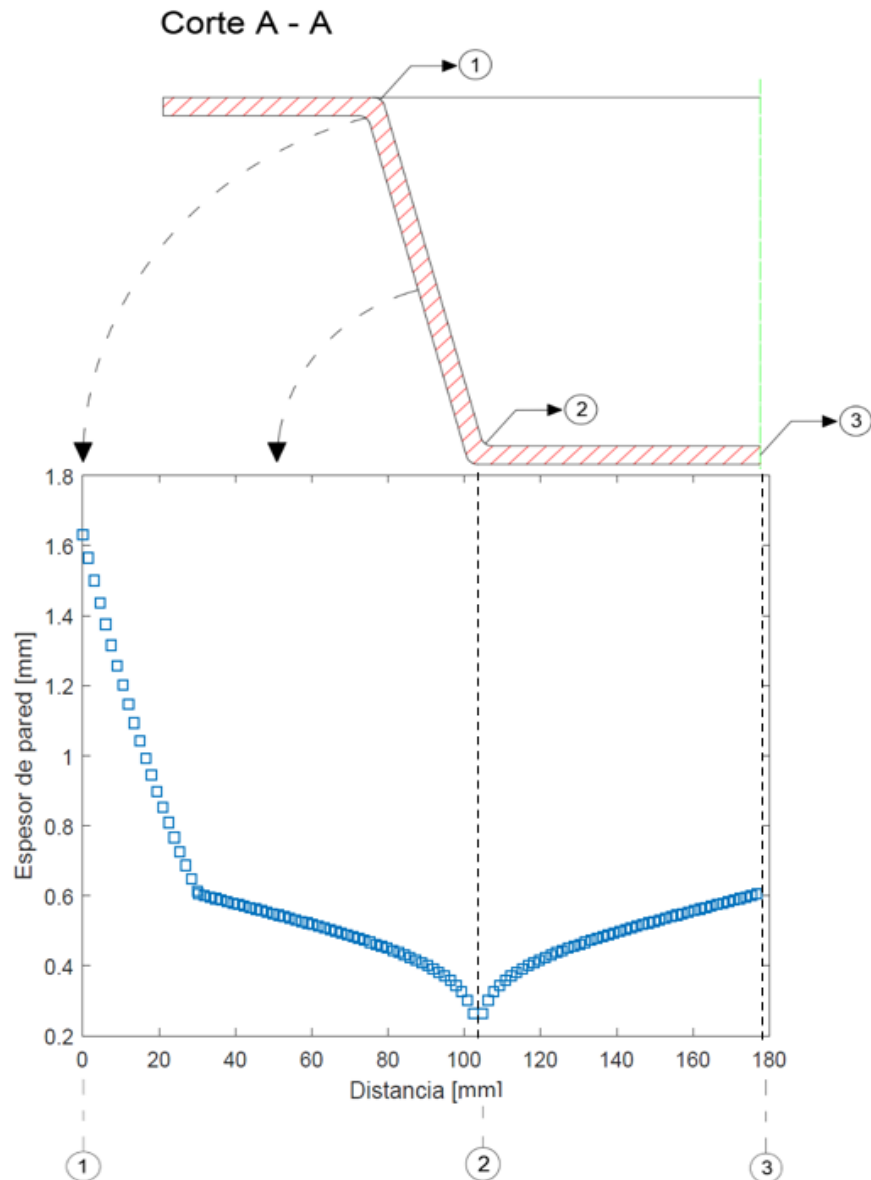


Figura 24: Ejemplo de la proyección de espesores sobre el plano de análisis.  
Fuente: Autor.

### 7.3. Análisis mediante elementos finitos

Las simulaciones numéricas de termoformado se pueden realizar con el módulo Polyflow del software especializado. Contiene algoritmos que pueden analizar sistemas donde ocurren deformaciones finitas dinámicas de elementos planos. Permite la aplicación de muchas ecuaciones constitutivas diferentes, pero la descripción más precisa del comportamiento de la lámina polimérica se puede obtener con el modelo constitutivo viscoelástico integral, como el modelo KBKZ (Zingoni, 2016). El proceso de configuración se indica en la (Figura 25), en el anexo2 se indica una configuración más profunda.

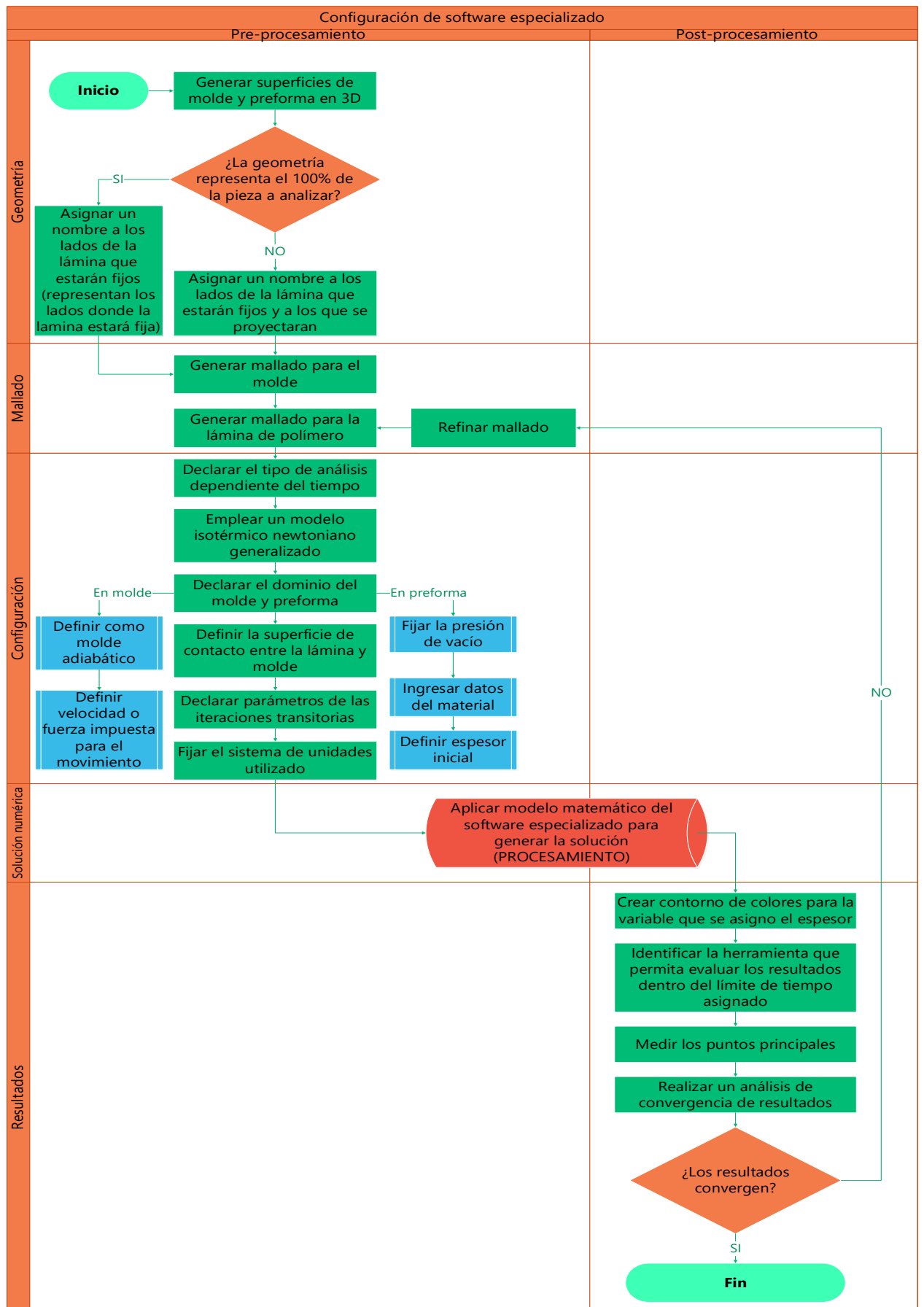


Figura 25: Diagrama de flujo de la programación del software especializado.  
Fuente: Autor.

### 7.3.1. Termoformado de un vaso cónico

Los principales parámetros empleados en este proceso y de los cuales se mencionarán en adelante se exponen en la (Tabla 3).

Tabla 3: Parámetros principales empleados en el FEM del caso 1.

Preforma	Material	HIPS
	Densidad	1040 kg/m <sup>3</sup>
	Espesor inicial	2mm
	Temp. De proceso	185 °C
Molde	Medida	30 cm x 30 cm
	Tipo de molde	Negativo
	Transferencia de calor	Adiabático
	Velocidad	60 mm/s
Proceso	Presión de vacío	7 kPa
	Tiempo de proceso	2 s

Fuente: Autor.

Para evaluar la distribución de espesores con diferente material se emplearán los parámetros indicados en la (Tabla 3), a diferencia que el material ocupado será LDPE con densidad de 930 kg/m<sup>3</sup>; y para indagar el efecto que produce la presión de vacío sobre la distribución de espesores se realizaran dos simulaciones más, en las cuales emplearemos los valores de presión de 12 y 20 kPa respectivamente.

#### 7.3.1.1. Geometría.

Debido a la simetría de: la geometría, vértices, cargas del molde y preforma, se analiza un cuarto de sus geometrías para mejorar el tiempo y costo computacional, se asume que las mordazas de sujeción de la lámina forman un cuadrado con dimensiones idénticas a la lámina. Por otro lado, en la preforma asignaremos un nombre a las aristas que estarán en contacto con las mordazas de sujeción y las aristas que más adelante servirán de eje de simetría para proyectar el vaso completo de análisis. Se tomará la distancia entre la lámina y el molde de 30mm.

#### 7.3.1.2. Mallado

Para el molde se utiliza una malla cuadrilátera no estructurada con un tamaño de elemento  $\geq 0.11\text{mm}$  y  $\leq 11.7\text{mm}$ , generando 25225 elementos y 50220 nodos, la cual se indica en la (Figura 26) debido a que el programa ocupara la superficie de esta malla como superficie de

contacto entre el film y el molde; no es necesario refinarla debido a que no entrara en análisis de deformación.

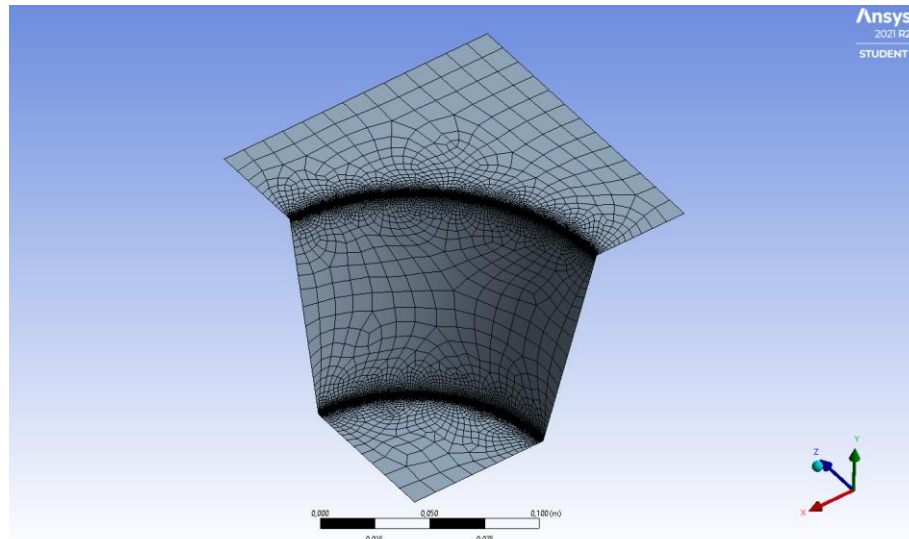


Figura 26: Mallado del molde.

Fuente: Autor.

Para el mallado de la preforma se ocupan elementos de superficie cuadrada, se realiza pruebas completas con tamaño de elemento desde 4 hasta 1 mm, se midió el espesor en 5 puntos del vaso termoformado para evaluar la convergencia de malla en función del error que presentan al disminuir el tamaño de elemento; como se puede observar en la (Tabla 4) el menor error se presenta con tamaño de 1 mm.

Tabla 4: Porcentajes de error para espesores con diferente tamaño de elemento del caso 1.

Tamaño de elemento [mm]	Espesores de pared [mm]					Error [%]
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	
4	1,665	0,971	0,615	0,821	0,983	
3,5	1,587	0,991	0,566	0,834	1	3,77%
3	1,571	0,996	0,551	0,84	1,01	1,16%
2,5	1,558	0,981	0,57	0,834	1	1,51%
2	1,548	0,988	0,536	0,828	0,998	1,72%
1,5	1,4	0,966	0,512	0,814	0,969	4,45%
1	1,386	0,963	0,497	0,821	0,967	1,08%

Fuente: Autor.

Aunque para los demás tamaños de elemento también existe una buena aproximación, tienen problemas para ajustarse a los radios del vaso, justo en la arista del fondo y en el diámetro mayor, esto es debido a que no existe los suficientes elementos y nodos que permitan a la preforma deformarse con más facilidad, en (la Figura 27) se puede observar que



para el tamaño de elemento de 1 mm tenemos el más alto número de elementos y nodos a diferencia de las demás.

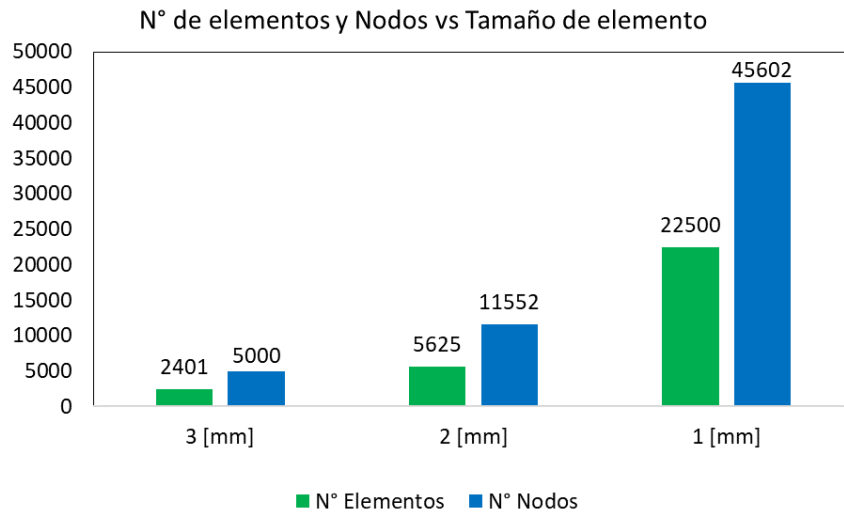


Figura 27: N.º de elementos y nodos generados en cada tamaño de malla, caso 1.  
Fuente: Autor.

### 7.3.1.3. Configuración para el análisis de FEM

El FEM será del tipo newtoniano generalizado isotérmico y el análisis será dependiente del tiempo. Es necesario tomar en cuenta la distancia que existe entre el molde y la lámina, para generar el movimiento del molde por una velocidad o fuerza impuesta, la cual será producto de una función de rampa debido a que este tendrá movimiento solo hasta entrar en contacto con la preforma, para esto es necesario que recorra una distancia de 30 mm y luego se quede estático.

La presión de vacío también será producto de una función de rampa, ya que empieza actuar justo cuando el molde entra en contacto con la preforma, hasta los 2 segundos. En la (Figura 28) se puede apreciar los valores y comportamiento de las funciones de rampa para el movimiento del molde y la presión de vacío.

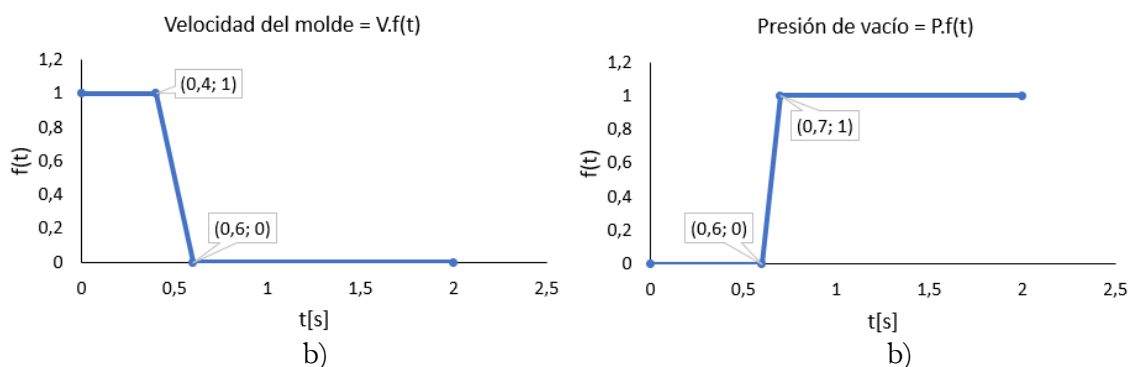


Figura 28: Función de rampa para la velocidad del molde y presión de vacío del caso 1.  
a) Velocidad de molde. y b) Presión de vacío

Fuente: Autor.

Para ingresar los datos del material se realizaron ensayos reológicos del polímero HIPS a la temperatura de 185°C las cuales se exponen más adelante, los datos reológicos del LDPE a 185 °C fueron realizados por (García, 2012); los datos obtenidos se cargaron en Polymat, una herramienta que ofrece Polyflow para realizar el ajuste de curvas de los modelos reológicos, se verificó que el modelo que más se acopla al comportamiento de los datos es el de Carreau – Yasuda. En la (Tabla 5) se presentan los valores de cada parámetro obtenido para el material empleado.

Tabla 5: Parámetros del modelo Carreau – Yasuda para HIPS y LDPE a 185 °C.

Material	Parámetros del modelo Carreau – Yasuda				
	Viscosidad a tasa de cizallamiento cero	Viscosidad a tasa de cizallamiento infinita	Tasa de corte		
	$\eta_0$	$\eta_\infty$	$\lambda$	<b>a</b>	<b>n</b>
HIPS	0.2652E+04	0.1165E-04	0.1493E-01	0.7077	0.1559E-05
LDPE	0.2020E+06	0.1286E-02	0.6434	0.1997	0.1923

Fuente: Autor.

#### 7.3.1.4. Postprocesamiento

Debido a que los problemas son dependientes del tiempo se revisa la deformación a diferentes tiempos del proceso, para ello se ocupa las distintas herramientas del módulo para proyectar la pieza de análisis mediante los ejes de simetría que fueron indicados en la etapa de configuración, y tener una mejor apreciación gráfica del proceso; se ocupa una paleta de colores con una escala lineal que indicara los niveles de medida en metros, para la recolección de datos se empleara un plano en donde se proyecta el perfil de la pieza con sus respectivos espesores.

##### 7.3.1.4.1 Termoformado de un vaso cónico

Se pudo observar de manera gráfica que la distribución de espesores para cada simulación es diferente a consecuencia de cambiar la presión de vacío, esto implica que la deformación en cada simulación también es diferente, en la (Figura 29) se puede observar como el material que está sometido a 12 kPa entra en contacto con el fondo del molde en un tiempo menor que a diferencia del material que está sometido a una presión de vacío de 7 kPa.

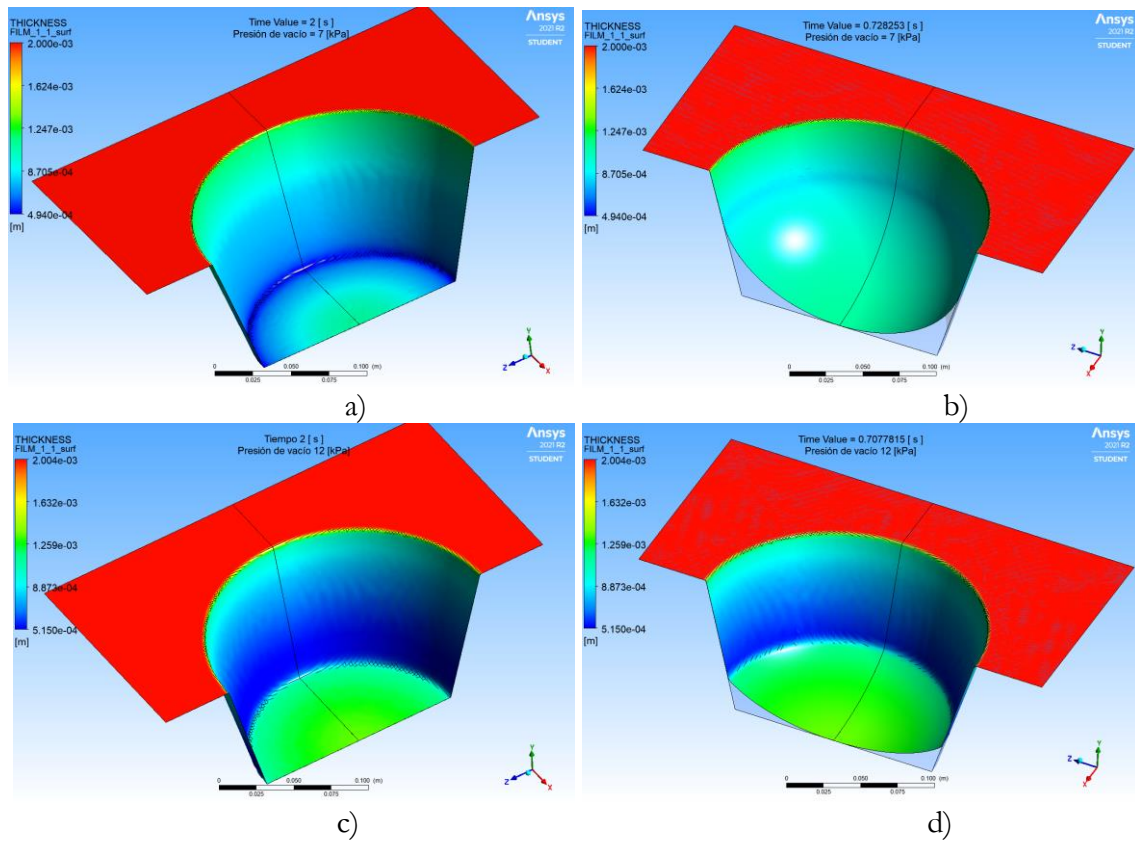


Figura 29: Resultados gráficos obtenidos para el caso 1.

a) y c) Termoformado con material HIPS, con presión de vacío de 7 kPa y 12 kPa respectivamente. b) y d) Instante en que el material entra en contacto con el fondo, a 7 kPa y 12 kPa respectivamente.

Fuente: Autor.

A manera de referencia se presenta la (Tabla 6) en donde se indica el número de nodos y tamaño de elemento generados mediante FEM para la simulación de (Selcuk & Olcay, 2013) y este caso de estudio.

Tabla 6: Parámetros de malla empleados para el FEM.

Software	Parámetros			
		Tipo de malla	Nº Elementos	Nº Nodos
ANSYS (Modulo Polyflow)	Film	Cuadrado 2D	22500	45602
	Molde	Cuadrado 2D	25225	50220
	<b>TOTAL</b>		47725	95822
Ls-Dyna™	Film	N/E	N/E	N/E
	Molde	N/E	N/E	N/E
	<b>TOTAL</b>		13525	16440

Fuente: Autor.

### 7.3.2. Termoformado de una carcasa principal de lámpara.

Los principales parámetros para este análisis se presentan en la (Tabla 7).

Tabla 7: Parámetros principales empleados en el FEM del caso 2.

<b>Preforma</b>	Material	HIPS
	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1040
	Espesor inicial [mm]	2
	Temp. De proceso [°C]	155
	Medida [cm x cm]	41 x 41
<b>Molde</b>	Tipo de molde	Negativo
	Transferencia de calor	Adiabático
	Velocidad [mm/s]	390
<b>Proceso</b>	Presión de vacío [kPa]	6.89
	Tiempo de proceso [s]	3

Fuente: Autor.

#### 7.3.2.1. Geometría

Se tomó un cuarto de la geometría del molde y preforma como se indica en la (Figura 30) debido a que la pieza es simétrica en sus 2 ejes principales y de esta manera se puede ahorrar tiempo y costo computacional. Se asumirá que la distancia entre la base del molde positivo y la preforma es de 110mm.

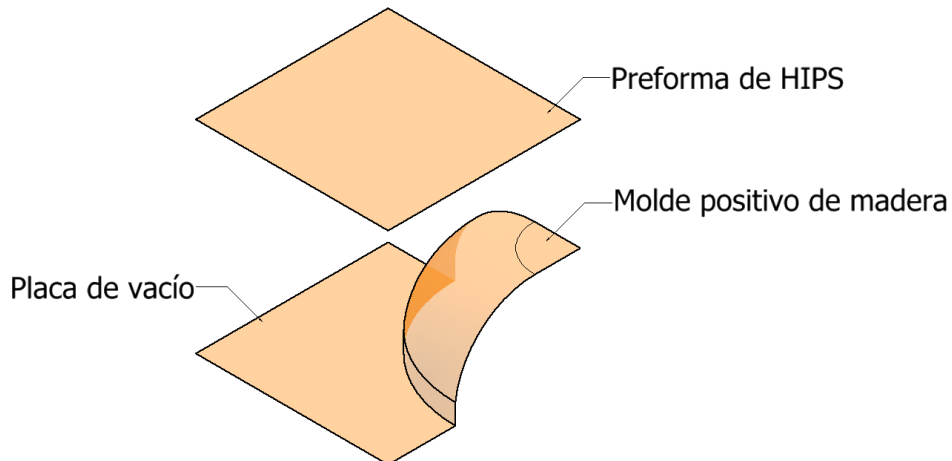


Figura 30: Superficies de molde y preforma empelada para el FEM.

Fuente: Autor.

#### 7.3.2.2. Mallado

Para el molde se realizó un refinamiento de mallado por defecto con un tamaño de elemento más pequeño, debido a que la superficie de malla no se adaptaba bien a la curvatura como se indica en la (Figura 31), aunque el molde no está expuesto a análisis de deformación, la superficie de malla incide en el contacto entre la preforma y el molde.

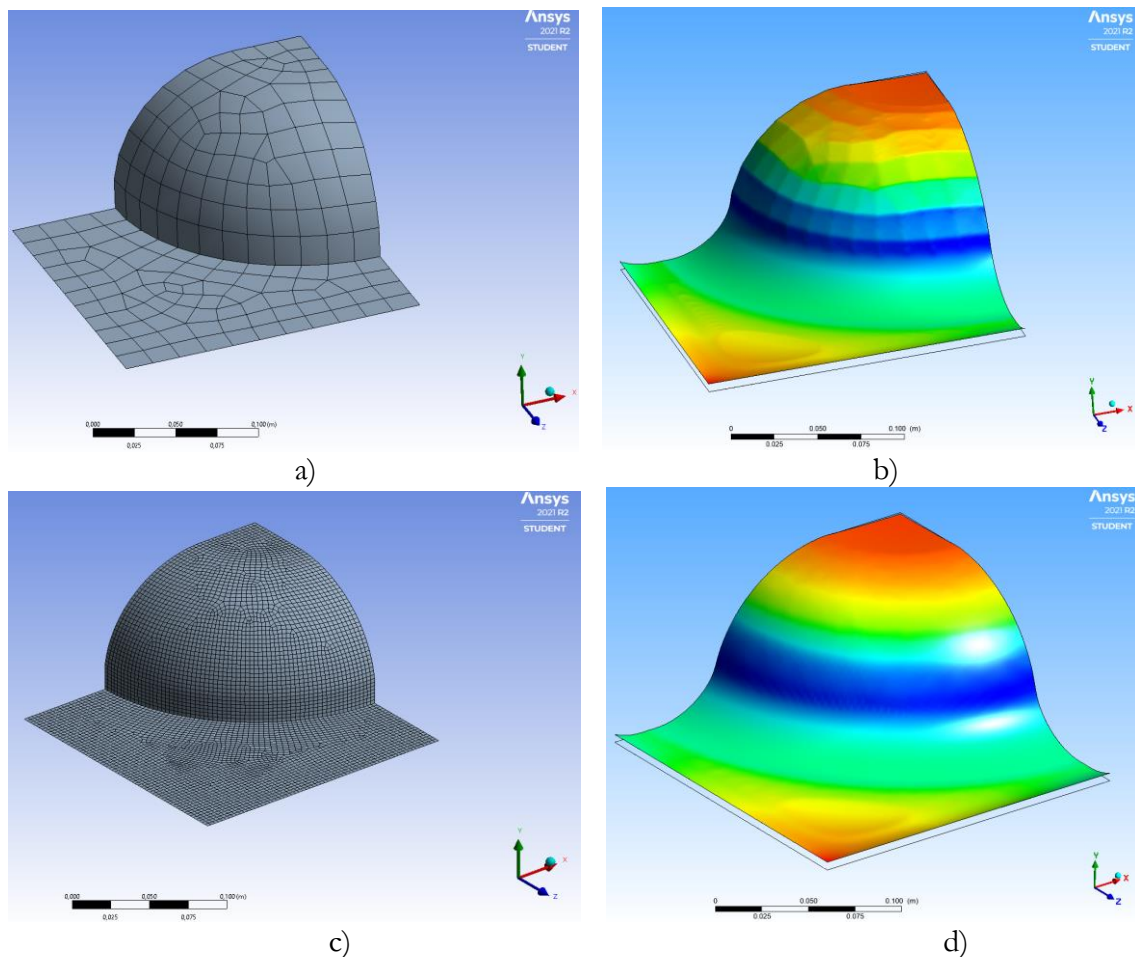


Figura 31: Mallado de molde positivo. a) Mallado por defecto con tamaño de elemento de 0.016 m. b) Resultados obtenidos con la malla por defecto. c) Refinamiento de malla con tamaño de elemento de 0.003 m. y d) Resultados obtenidos con la malla refinada.

Fuente: Polyflow.

Se empleó una malla de superficie cuadrada y se realizaron pruebas completas con mallas de diferente tamaño de elemento, entre 4 y 1 mm; luego se tomaron 5 medidas para cada prueba con la intención de obtener el mínimo error entre cada malla y verificar que los resultados converjan entre ellos. En la (Tabla 8) se indica los resultados de estas pruebas, siendo la malla con tamaño de elemento de 1 mm el mejor resultado.

Tabla 8: Porcentajes de error para espesores con diferente tamaño de elemento del caso 2.

Tamaño de elemento [mm]	Espesores de pared [mm]					Error [%]
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	
8	1,9992	1,996	1,8455	1,3986	1,5278	
7	1,9891	1,982	1,8065	1,3713	1,4959	1,50%
6	1,9892	1,982	1,81	1,3489	1,5077	0,53%
5	1,9891	1,982	1,811	1,3488	1,507	0,02%

Fuente: Autor.

En la (Figura 32) se indican las pruebas realizadas con diferente tamaño de malla empleada en el film, siendo el mallado con tamaño de elemento de 0.006 m el más óptimo y en donde los resultados más se aproximan a los reales y donde comienzan a converger.

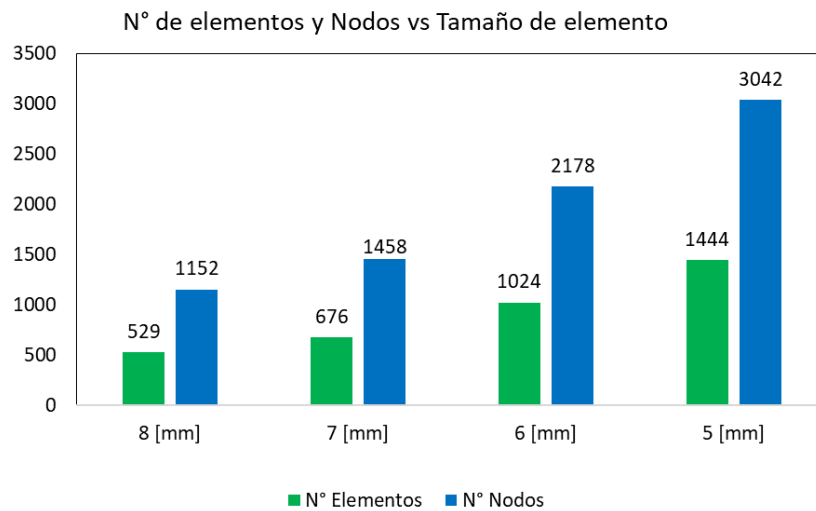


Figura 32: N° de elementos y nodos generados para cada tamaño de malla, caso 2.  
Fuente: Autor.

### 7.3.2.3. Configuración

Al igual que en el caso anterior se debe tomar en cuenta que el FEM es del tipo newtoniano isotérmico generalizado, y el análisis dependiente del tiempo; el movimiento del molde y la presión de vacío al igual que en el caso 1 son producto de una función del tiempo las cuales se exponen en la (Figura 33), se asumirá que la distancia entre el molde y la preforma es de 110 mm.

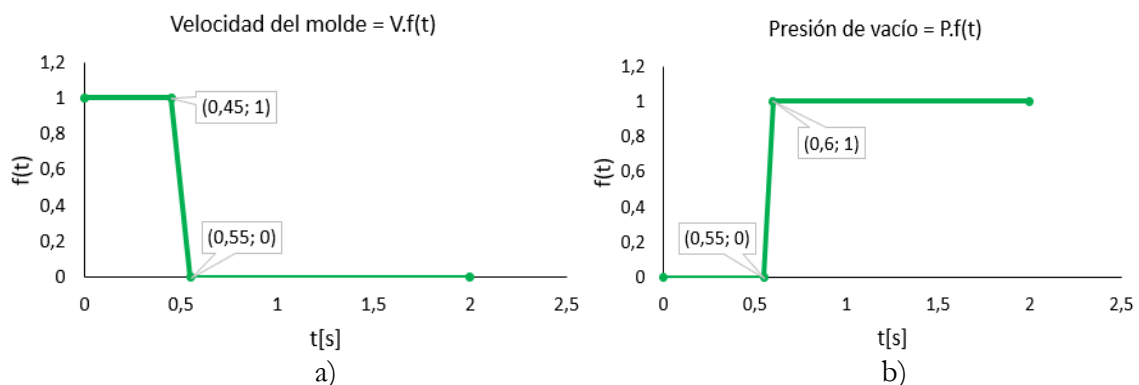


Figura 33: Función de rampa para la velocidad del molde y presión de vacío del caso 2.  
a) Velocidad del molde. b) Presión de vacío  
Fuente: Autor.

Para cargar los datos del programa se realizó un ensayo reológico al HIPS a la temperatura de 150 °C, y los resultados obtenidos se detallan en la tabla.

Tabla 9: Parámetros del modelo de Cross para HIPS a 155 °C.

Material	Parámetros del modelo de Cross		
	Viscosidad a tasa de cizallamiento cero	Pendiente del comportamiento pseudoplástico	
	$\eta_0$	$1-n$	$\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*$
HIPS	0.5861E+06	0.3378	0.9456E+04

Fuente: Autor.

#### 7.3.2.4. Postprocesamiento

De acuerdo a los resultados obtenidos nombraremos las 3 zonas principales de análisis las cuales se presentan en la (Figura 34).

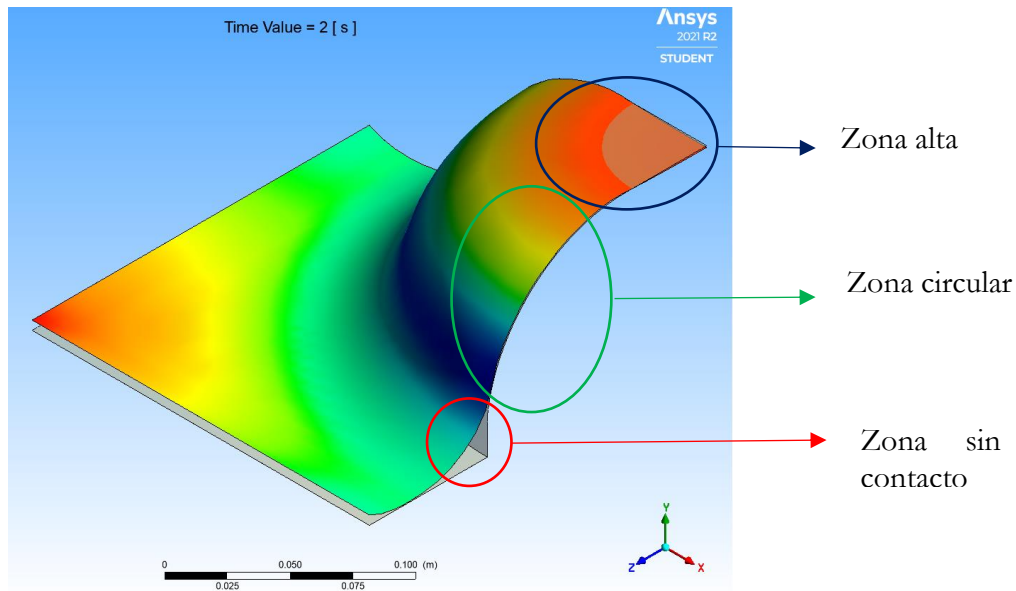


Figura 34: Zonas de análisis para la pieza termoformada.

Fuente: Autor.

Se proyectó la zona de análisis la cual se muestra en la (Figura 35) con el fin de obtener la mitad de la pieza termoformada para observar el proceso a diferentes tiempos, también se puede apreciar el molde y las zonas en las que el material no llega a tener contacto con el mismo; en la zona alta correspondiente al perfil de espesores de color rojo se mantienen el espesor inicial de la lámina, en la zona circular al igual que de manera experimental la lámina no entra en contacto con toda la superficie del molde y entre la placa de vacío y el molde se genera una zona sin contacto.

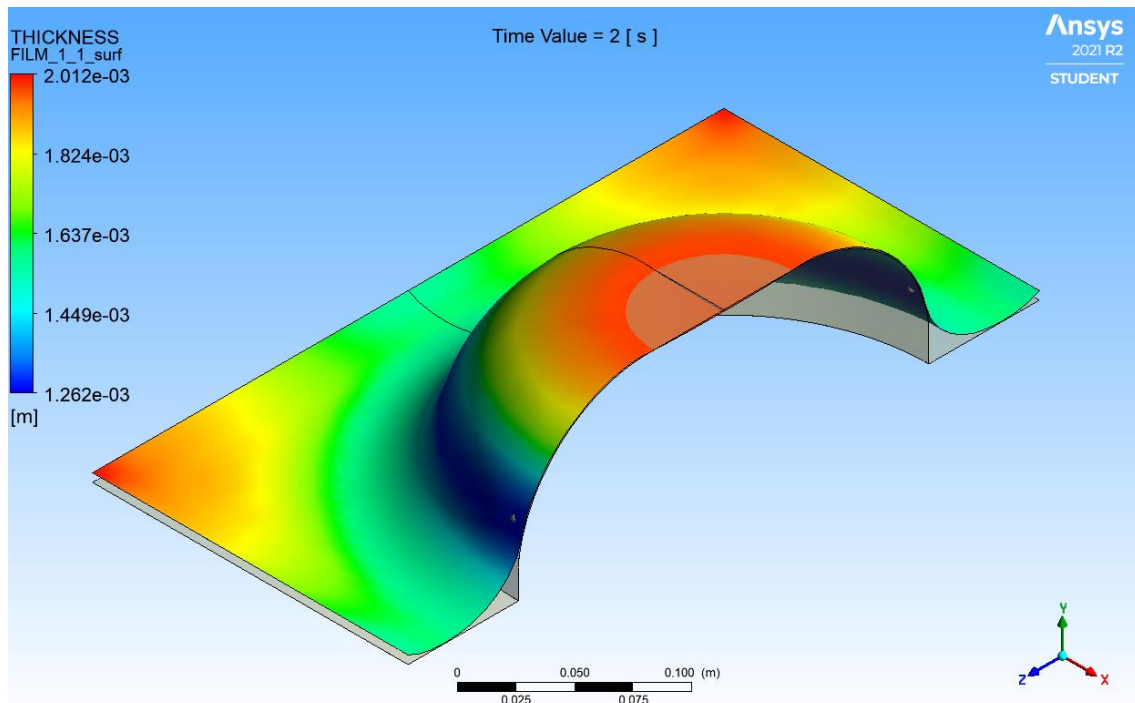


Figura 35: Resultados del FEM para el caso 2.  
Fuente: Autor.

#### 7.4. Ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos reológicos al polímero HIPS con la finalidad de evaluar los valores de la viscosidad de cizallamiento a las temperaturas de termoformado; el equipo, instrumento y software empleado para realizar el ensayo se exponen en la (Tabla 10).

Tabla 10: Equipos, instrumentos y software empleados para el ensayo reológico.

Descripción	Marca	Serie
Reómetro Capilar	Malvern	RH2200
Software FlowMaster	Malvern	3000
Balanza	Ohaus	SC4010

Fuente: Autor.

En la (Tabla 11) se indican los parámetros iniciales empleados para los 2 ensayos reológicos a 185°C y 155°C.

Tabla 11: Parámetros iniciales de los ensayos reológicos.

Parámetros iniciales	Prueba 1 – Caso 1	Prueba 2 – Caso 2
Temperatura [°C]	185	155
Método de prueba	Twin bore, Bagley corrected	
Presión de compactación y precalentado [MPa]	Pistón izquierdo 0.5 – Pistón derecho 0.25	
Orificio de los dados [mm]	Ø 1.0	
1er Pre-prueba [min]	5	
2da Pre-prueba [min]	4	

Fuente: Autor.



Los resultados obtenidos para el caso 1 se muestran en la (Tabla 12).

Tabla 12: Valores de viscosidad obtenidos para el HIPS a 185 °C

	Corrected shear rate (/s)	n	Position (mm)	Shear rate (/s)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)	Speed (mm/min)	TDie (°C)
1	10,69	0,74	211,71	10,00	21,08	1971,33	0,83	183,96
2	19,78	0,68	209,52	18,02	31,26	1580,75	1,50	184,12
3	36,73	0,62	206,49	32,46	50,23	1367,38	2,70	184,26
4	67,97	0,56	203,41	57,99	73,86	1086,76	4,82	184,31
5	128,12	0,49	199,67	104,75	100,55	784,84	8,70	184,36
6	244,29	0,43	194,76	189,59	131,14	536,83	15,76	184,36
7	471,01	0,36	187,95	342,61	166,04	352,53	28,47	184,39
8	923,66	0,29	176,87	618,46	203,50	220,32	51,40	184,41
9	1857,34	0,22	158,92	1114,07	248,36	133,72	92,58	184,44
10	3907,81	0,15	125,02	2007,22	303,88	77,76	166,80	184,49

Fuente: FlowMaster.

Para el caso 2, los resultados del ensayo se indican en la (Tabla 13).

Tabla 13: Valores de viscosidad obtenidos a 155 °C

	Corrected shear rate (/s)	n	Position (mm)	Shear rate (/s)	Shear stress (kPa)	Shear viscosity (Pa.s)	Speed (mm/min)	TDie (°C)
1	13,34	0,44	184,51	10,00	134,85	10107,21	0,83	155,17
2	23,81	0,44	182,22	18,02	172,70	7252,18	1,50	155,12
3	42,52	0,45	179,30	32,46	221,46	5208,68	2,70	155,08
4	75,32	0,46	176,38	58,00	281,25	3733,88	4,82	155,07
5	134,85	0,47	172,07	104,72	381,83	2831,51	8,70	155,06
6	242,14	0,48	165,67	189,61	540,29	2231,29	15,76	155,06
7	434,03	0,49	158,20	342,59	642,93	1481,32	28,47	155,07

Fuente: FlowMaster.

## 8. Análisis de resultados

### 8.1. Termoformado de un vaso cónico

De manera general se observa que los resultados experimentales obtenidos por (Selcuk & Olcay, 2013) expuestos en la (Figura 36), desde el diámetro mayor o distancia 0, hasta la distancia 28.32 mm correspondiente a la zona 1, los espesores disminuyen con un comportamiento lineal. Luego de haber entrado en contacto con el fondo, la gráfica experimental indica que el avance del material por la pared y fondo del molde hasta llegar a la esquina del fondo no dejó espesores simétricos entre estas paredes; es decir que los espesores de la pared del molde, desde la distancia 28.32 mm hasta la arista del fondo o distancia 103.5 mm presentan un incremento en el espesor de la pared hasta la distancia de

58 mm correspondiente a la zona 2, y luego una disminución del espesor hasta llegar a la arista del fondo como se puede observar en la zona 3; en cambio, los espesores obtenidos en el fondo cuando el material se deforma desde la distancia de 176.7 mm hasta la arista del fondo distancia 103.5 mm presentan disminución lineal; esto es consecuencia de tener un calentamiento no uniforme en la superficie de la lámina lo que produce deformación desigual en la superficie de la lámina como lo es el caso de la zona 2 y zona 3.

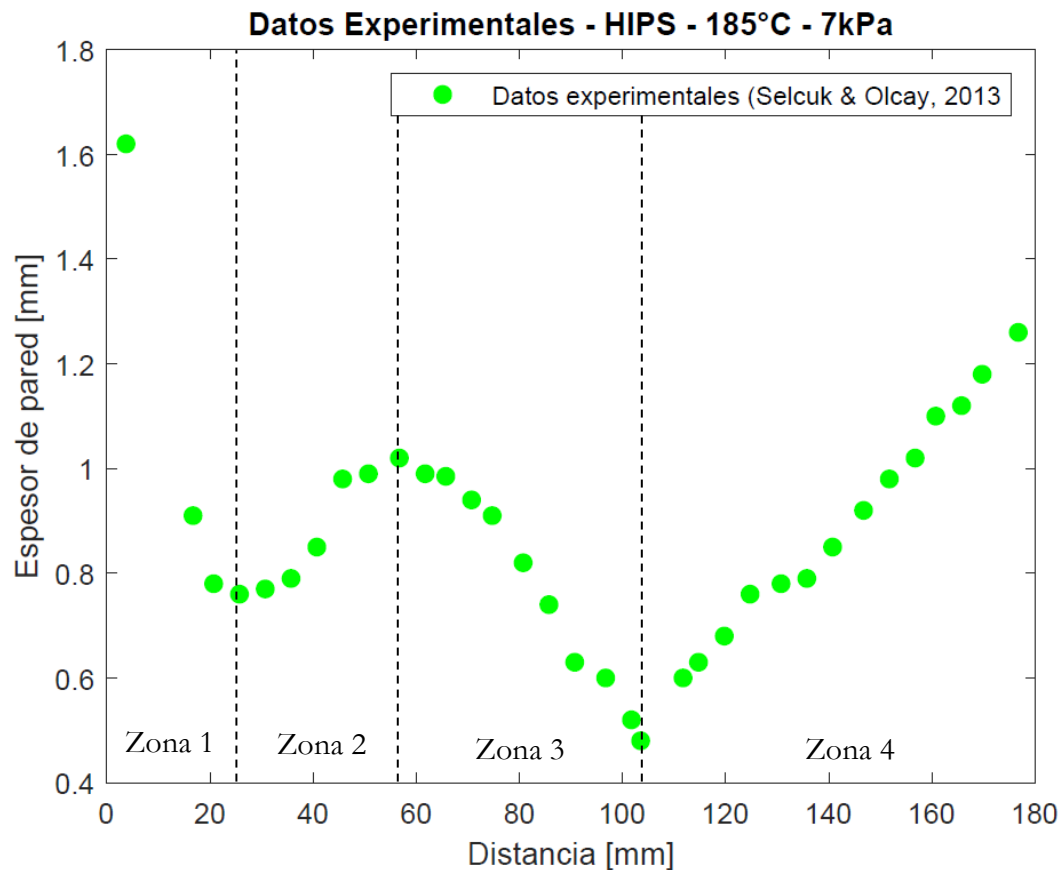


Figura 36: Datos experimentales del termoformado de un vaso cónico.  
Fuente: (Selcuk & Olcay, 2013).

### 8.1.1. MEG

Los resultados obtenidos de manera analítica se muestran en la (Figura 37) en donde se aprecia una disminución lineal en la zona 1 desde que inicia el proceso de deformación de la lámina hasta que entra en contacto con el fondo, en la distancia 30.32 mm, hasta esta instancia los resultados son muy cercanos a los experimentales con un error despreciable; aparte de esta zona se observa que los espesores de la zona 2 y 3 disminuyen con un comportamiento logarítmico hasta llegar a la esquina del fondo o distancia 103.5 mm, de la misma manera y al mismo tiempo ocurre la deformación del material cuando recorre el fondo del molde hasta llegar a la esquina; es por eso que se puede observar que los espesores son simétricos y su eje estaría ubicado en el punto 103.5 mm. También se observa en los resultados experimentales que el espesor en el fondo del vaso (distancia 176,2 mm) es de

1.26 mm mientras que el espesor calculado es 0.61 mm, esto se debe a que el método analítico no toma en cuenta algunas variables del proceso, como la presión de vacío que incide principalmente en la deformación del material; el error cuadrático medio entre los valores experimentales y obtenidos analíticamente es del 13.4% de error.

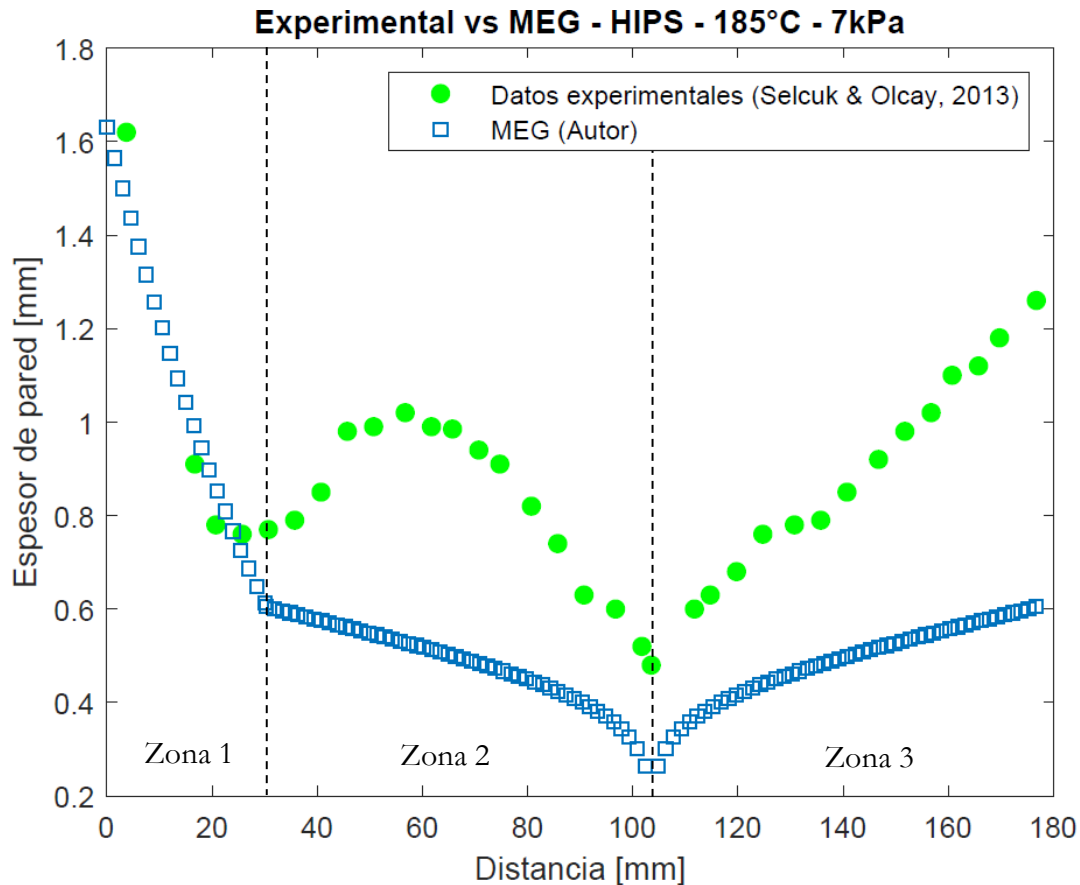


Figura 37: Resultados del caso 1 obtenidos de manera experimental y MEG.  
Fuente: Autor.

### 8.1.2. FEM

En los datos obtenidos mediante el FEM los cuales se indican en la (Figura 38) se observa que en una parte de la pared del vaso desde la distancia 0 hasta la distancia de 50 mm correspondiente a la zona 1, la distribución de espesores disminuye linealmente, a diferencia de los datos experimentales que disminuyen linealmente hasta tener un espesor de pared de 0.78 mm en la distancia de 25 mm y luego tiene un incremento de espesor llegando hasta 1 mm en la distancia de 50 mm y 1.2 mm hasta la distancia de 55mm; los datos obtenidos en la zona 2 siguen disminuyendo de manera lineal, pero ahora con una pendiente menor que al principio, hasta la distancia de 90 mm; desde este punto hasta la esquina del fondo del vaso comprendida por la zona 3, los datos obtenidos con los experimentales presentan el mismo comportamiento y el mismo valor, lo mismo pasa en el fondo del vaso desde la esquina hasta la distancia de 165 mm comprendido por la zona 4, los espesores

obtenidos y los experimentales tienen valores cercanos con un error menor al 7%; justo en el centro del fondo (distancia 176.2 mm) el espesor obtenido es de 1.10 mm y el experimental es de 1.28 mm. Las variaciones de espesor pueden ser consecuencia de la rugosidad del molde y las caídas o variaciones de la presión de vacío, pues mediante el FEM los valores de presión son efectivos, de esta manera se toma en cuenta que no habrá ningún diferencial de presión en el proceso; el error cuadrático medio obtenido entre la muestra experimental y los obtenidos es del 2.2% de error.

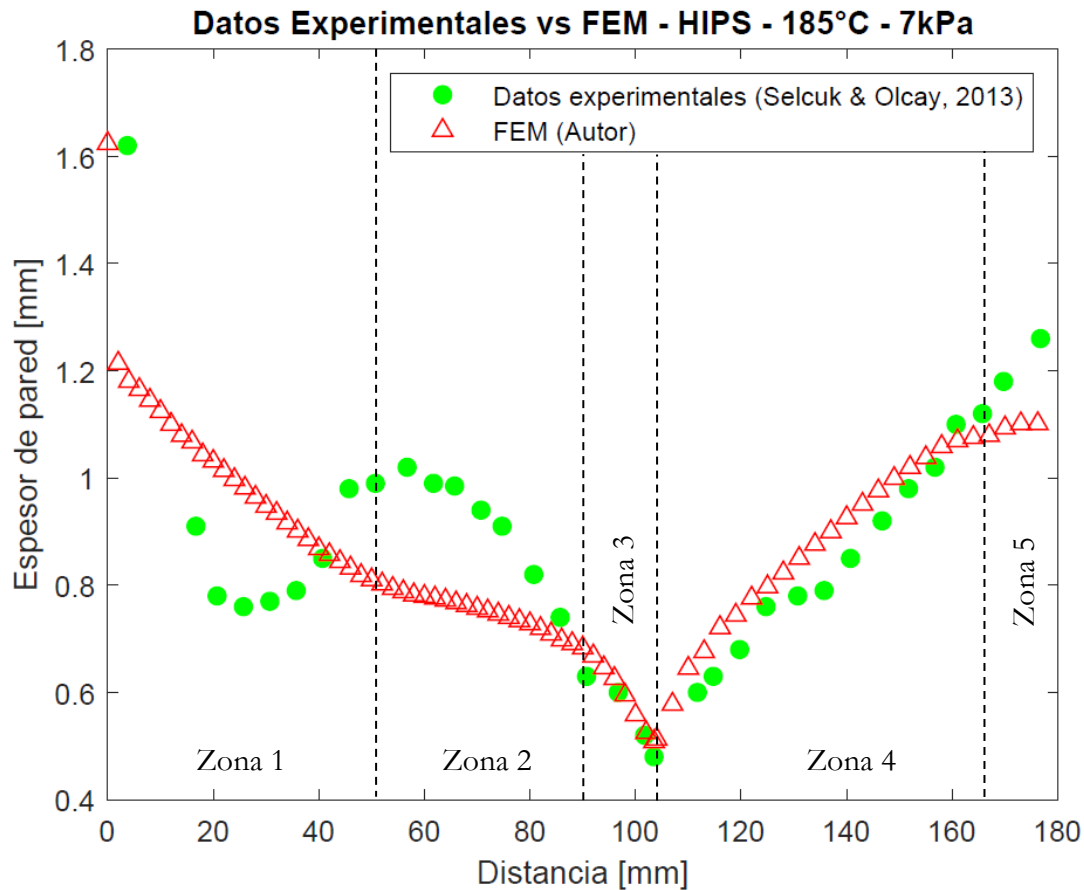


Figura 38: Resultados del caso 1 obtenidos de manera experimental y FEM  
Fuente: Autor.

En la (Figura 39) se exponen los espesores de pared obtenidos al emplear HIPS y LDPE en donde se observa que el comportamiento de la distribución de espesores es idéntico; en la esquina o radio del fondo (distancia 103.5 mm) el espesor del LDPE es mayor al HIPS, 0.61 mm y 0.51 mm respectivamente y al final en el centro del fondo (distancia 176.2 mm) se observa una pequeña diferencia entre los espesores del HIPS y LDPE de 1.16 mm y 1.10 mm.

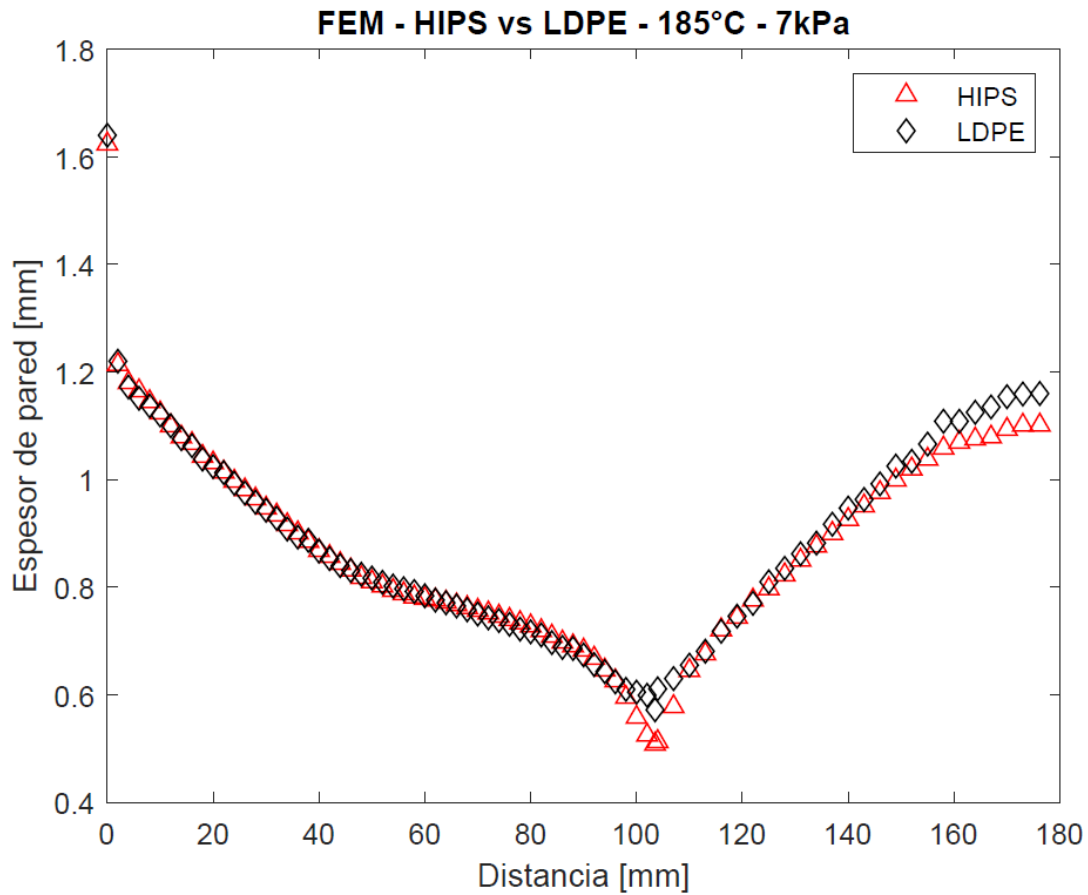


Figura 39: Resultados obtenidos por MEG utilizando HIPS y LDPE.  
Fuente: Autor.

Los resultados obtenidos para diferentes presiones de vacío en donde se empleó HIPS se muestran en la (Figura 40) En la cual podemos observar que la tendencia de las gráficas es idéntica; los espesores de la pared del vaso presentan disminución con el aumento de la presión de vacío, mientras que el fondo del vaso presenta un aumento del espesor como consecuencia del aumento de la presión de vacío; también se observa que para las presiones de 7 kPa y 12 kPa los espesores en la esquina del fondo son mayores a diferencia del termoformado con menor presión; el aumento de presión implicaría que la disminución de del espesor en las paredes presenten rasgaduras en el material, y a su vez el vaso pierda rigidez en las paredes.

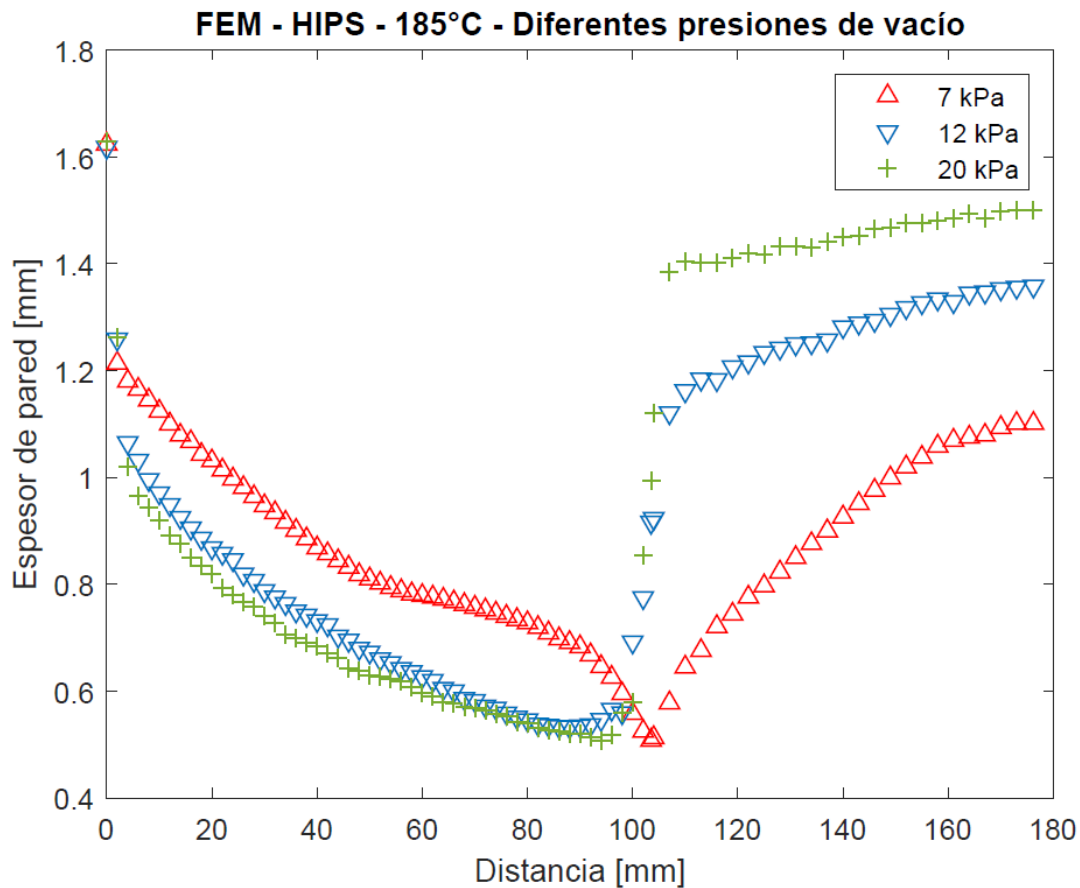


Figura 40: Resultados obtenidos por FEM a diferente presión de vacío.  
Fuente: Autor.

## 8.2. Termoformado de una carcasa de lámpara

Se puede observar que en la zona alta de la media luna, que va desde la distancia de 92.5 mm hasta los 182.5 mm comprendido por la zona 3, las medidas de espesores experimentales como las obtenidas mediante el FEM son muy cercanos y no superan el 1% de error, manteniéndose en la medida de  $2.0 \text{ mm} \pm 0.05$  debido a que esta superficie es horizontal y la primera que entra en contacto con la preforma, esto tiene coherencia con lo observado experimentalmente, ya que las cuadrículas de esta zona no presentaban alargamiento, por lo que la medida del espesor en esta zona se mantiene; en cambio, las zonas 2 y 4 representa la zona circular en donde los espesores disminuyen con tendencia cuadrática hasta 1.28 mm mediante el FEM y en los experimentales hasta 1.5 mm en la zona 2 y 1.21 mm en la zona 4; las zonas 1 y 5 es donde la preforma no tiene contacto con el molde, los resultados del FEM indican que el incremento de los espesores tiene un comportamiento lineal hacia las pinzas de sujeción para las 2 zonas, llegando hasta 1.5 mm de espesor, por otra parte, los resultados experimentales en la zona 1 también indican un incremento lineal llegando hasta 1.84 mm de espesor, mientras que en la zona 5 los espesores aún decrecen

linealmente hasta 1.1 mm y luego se incrementan hasta 1.21 mm en dirección hacia las mordazas de sujeción de la lámina; en los resultados experimentales los espesores de la zona 5 con la zona 1 no presentan simetría, obteniendo en la zona 5 espesores más delgados debido a que, en la estación de calentamiento la superficie de la lámina no llega a tener una zona de calentamiento homogénea, lo que provoca que en ciertas zonas el material se deforme menos; el error cuadrático medio entre los resultados experimentales y los obtenidos por FEM es del 1.53%.

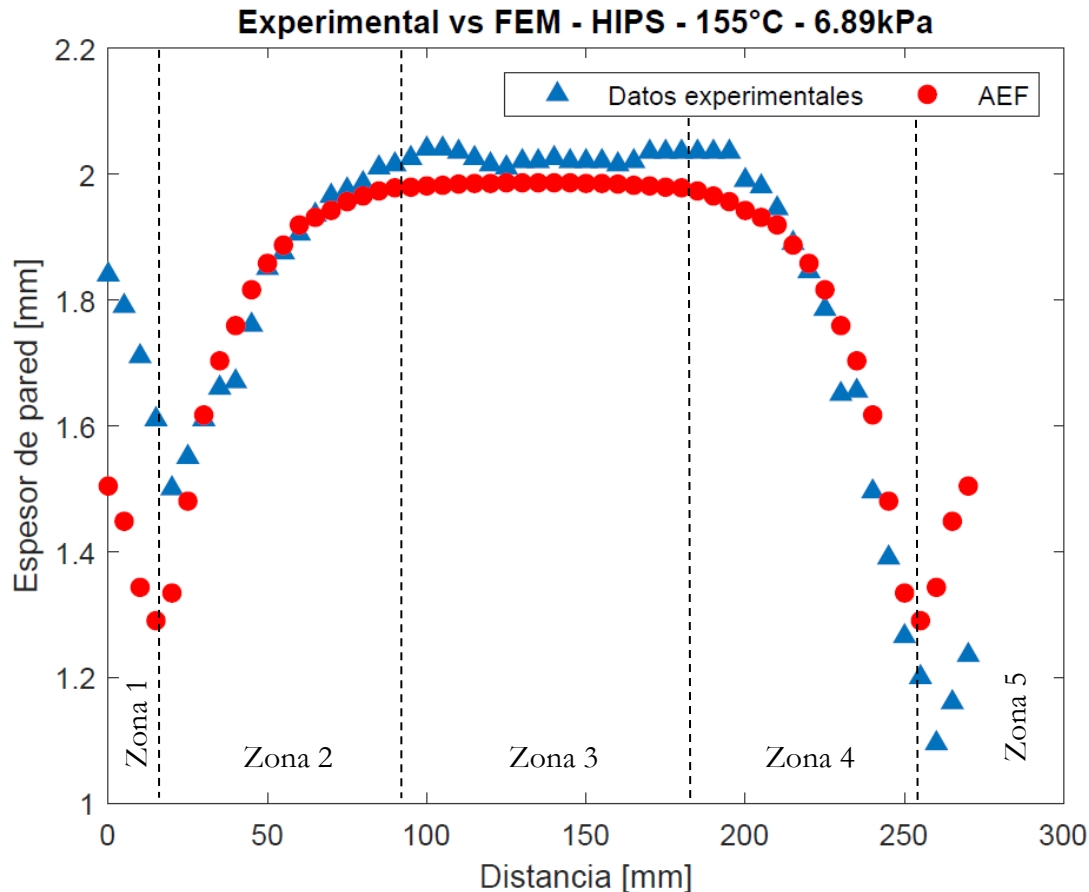


Figura 41: Resultados obtenidos de manera experimental y mediante FEM para la carcasa de lámpara.

Fuente: Autor.

## 9. Conclusiones

- Se logró identificar las variables que inciden en el proceso de termoformado y la manera en que estas afectan el acabado de las piezas; siendo más importantes la temperatura de la lámina y presión de vacío, pues afectan directamente en la distribución de espesores y que la lámina tome la forma del molde hasta el mínimo detalle.
- Al desarrollar las ecuaciones para predecir el espesor de pared se observó que: los puntos principales de cuales depende la distribución de espesores para los moldes

profundos es el instante en que el material entra en contacto con el fondo y para los poco profundos el instante que entra en contacto con el fondo y luego con la pared; los resultados obtenidos mediante este método no son cercanos a los experimentales debido a que el modelo no toma en cuenta variables de: temperatura, presión y tiempo, pero tienen una buena aproximación al comportamiento real de la distribución de espesores.

- La diferencia entre los espesores obtenidos por el FEM y experimental para el termoformado de un vaso cónico radica principalmente por la tendencia de los espesores a lo largo de la pared del vaso, pues desde el momento que empieza a deformarse el material tiende a disminuir de espesor y en los resultados experimentales, existe un incremento del espesor en la parte central de la pared, que puede ser producido por caída de presión del sistema de vacío, la rugosidad del molde, temperatura no uniforme en el molde y también a que no se logró calentar uniformemente la lámina antes de realizar el proceso de termoformado.
- Los resultados obtenidos por el FEM y de manera experimental para el termoformado de la carcasa principal de lámpara, presentan una mínima diferencia debido a que el FEM toma en cuenta que: la temperatura del material es homogénea en toda la superficie de la lámina, la presión de vacío no presenta caídas de presión como si ocurre de manera experimental, el acabado de la superficie del molde y la rugosidad es constante en toda la cavidad del molde; la falta de orificios de vacío en el molde positivo y la falta de presión en la bomba de vacío son el factor principal para que exista la pequeña diferencia entre espesores experimentales y los obtenidos mediante FEM.

## **10. Recomendaciones**

- Obtener ecuaciones mediante las cuales se pueda predecir el espesor de pared en piezas de geometría más complejas, tomando en cuenta las propiedades de cada material y la presión de formado.
- Desarrollar un proceso de simulación mediante software especializado en el cual se pueda obtener el perfil de temperatura que debe aplicar a la lámina en función de la geometría del molde, para que el espesor de pared sea uniforme en todas las partes.
- Usar un software especializado para la simulación del termoformado en donde se tome en cuenta los orificios de vacío.



## 11. Referencias

- Acevedo, G., & Chávez, J. (2015). *Automatización del sistema de termoformado para optimizar los tiempos de termoformado de láminas PET*.  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/157/B2-M-18255.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alvarez, M. L. C. (1997). *El ABC de los plásticos*. Universidad Iberoamericana.
- Arévalo, C. (2017). *Simulación de los parámetros de procesamiento en las características de una pieza de poliamida 6 obtenida por moldeo por inyección* [Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16983/1/CD-7560.pdf>
- Autodesk. (s. f.). *Análisis de elementos finitos*. Recuperado 28 de julio de 2020, de  
<https://www.autodesk.mx/solutions/finite-element-analysis>
- Azdest, T., Doniavi, A., Rash Ahmadi, S., & Amiri, E. (2013). Numerical and experimental analysis of wall thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1), 113-122. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4007-5>
- Bejarano Arévalo, J. L. (2003). *Termoformado del compuesto polietileno de alta densidad con refuerzo lignocelulósico* [Universidad de los Andes].  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21091/u246038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Belmonte, C. (2012). *Desarrollo de sistema de bajo coste para termoconformado por vacío de láminas plásticas* [Tesis de Máster, Universitat Politècnica de València].  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/60342/TFM%20-%20Belmonte%20Picazo,%20C..pdf?sequence=1>
- Carvajal, A., & Paredes, D. (2013). *Automatización del sistema de termoformado de láminas de poliestireno para la empresa Latermec Cia. Ltda.* [Escuela Politécnica Nacional].  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5550>

- Cedron, J., Landa, V., & Robles, J. (2011). Polímeros. En *Química general*.  
<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>
- Cobos, H. (2009). *Mejoramiento de la eficiencia de la sección de termoformado para disminuir las paradas no programadas de Las maquinas en la empresa plásticos Soria*. Universidad de Guayaquil.
- Coelho, P., & Pinho, F. (2015). *Comportamiento Reológico de algunas Soluciones de Polímeros Acuosos Diluidos*.
- Crawford, R. J. (1998). Chapter 4—Processing of plastics. En R. J. Crawford (Ed.), *Plastics Engineering (Third Edition)* (pp. 245-342). Butterworth-Heinemann.  
<https://doi.org/10.1016/B978-075063764-0/50006-6>
- Espinosa, J. (2019). *Evaluación del proceso de termoformado para la obtención de la carcasa de la alarma ChevyStar, utilizando ingeniería inversa y simulación por elementos finitos*. [Universidad internacional SEK]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3309>
- Federico, M., & Dosis, S. (2016, agosto 11). Simulación de deformación + Texturas gráficas aplicadas a termoformado. *Dosis & Federico / Innovación + Diseño*.  
<http://www.dosisfederico.com.ar/blog/disenio-industrial/simulacion-de-deformacion-texturas-graficas-aplicadas-a-termoformado/>
- García, G. (2012). *Estudio y medición de la reología tangencial sobre los polímeros Poliestireno y Polipropileno* [Tesis, Universidad Politécnica de Cartagena].  
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2846/pfc4306.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufctura Mode*. Pearson Educación.
- Ingeniería, M. (2015, marzo 31). Polímeros. *materialesdeingenieria1*.  
<https://materialesdeingenieria1.wordpress.com/2015/03/31/polimeros/>
- Joya, D. (2006). *Optimización del proceso de termoformado en polipropileno para envases*. Universidad de los Andes.

- Klein, P. (2009). Fundamentals of plastics thermoforming. *Synthesis Lectures on Materials Engineering*, 1(1), 1-97. <https://doi.org/10.2200/S00184ED1V01Y200904MRE001>
- Koziey, B. L., Ghafur, M. O., Vlachopoulos, J., & Mirza, F. A. (1997). Chapter 3 Computer simulation of thermoforming. En D. Bhattacharyya (Ed.), *Composite Materials Series* (Vol. 11, pp. 75-89). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0108\(97\)80005-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0108(97)80005-7)
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection*. <https://silo.pub/handbook-of-materials-selection.html>
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*. Librería de diseño de plásticos. [https://books.google.com/books/about/Polypropylene.html?id=pw\\_I2D0zkDYC](https://books.google.com/books/about/Polypropylene.html?id=pw_I2D0zkDYC)
- Martínez, M., & Patiño, D. (2015). *Simulación por ordenador mediante el método de elementos finitos y optimización por el método de ingeniería robusta, de conectores para estantería metálica* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7767/1/UPS-CT004623.pdf>
- Mayorga, E., & Padilla, F. (2011). *Automatización para el proceso de la máquina sopladora de envases plásticos de la empresa N.S. industrias*. [Tesis de Pregrado, LATACUNGA / UTC / 2011]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1090>
- McCool, R., Martin, P. J., & Harkin-Jones, E. (2006). Process modelling for control of product wall thickness in thermoforming. *Plastics, Rubber and Composites*, 35(8), 340-347. <https://doi.org/10.1179/174328906X143859>
- Mitsoulis, E. (2013). 50 Years of the K-BKZ Constitutive Relation for Polymers. *ISRN Polymer Science*, 2013, e952379. <https://doi.org/10.1155/2013/952379>
- Modławski, M., & Tomasz, J. (2018). Simulación por computadora del proceso de termoformado y su verificación utilizando un molde de herramientas rápido. 157, 02032 (2018). <https://doi.org/10.1051 / mateconf / 201815702032>

- Molina, V., & Pito, E. (2008). *Diseño de una termoformadora de envases plásticos*. Escuela Politécnica Nacional.
- Morales, R. A., & Candal, M. V. (2004). *Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas CAD/CAE*. file:///C:/Users/ASUS/Downloads/5812-12808-1-SM.pdf
- Paltán, C. (2016). *Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13383>
- Pepliński, K., & Mozer, A. (2011). Ansys polyflow software use to optimize the sheet thickness distribution in thermoforming process. *Journal of Polish CIMAC, Vol. 6*(no 3), 215-220.
- Plastiglas de México, S.A. (s. f.). *Manual Técnico Termoformado*. <https://tecnologia3bunlp.files.wordpress.com/2015/03/manual-determoformado.pdf>
- Poszwa, P., & Szostak, M. (2016). *Simulación del proceso de termoformado utilizando el software ANSYS Polyflow*. <https://doi.org/10.1201/9781315641645-298>
- Roca, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rosenzweig, N., Narkis, M., & Tadmor, Z. (1979). *Wall Thickness Distribution in Thermoforming*. 19(13). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.760191311>
- Sánchez, J., & Velásquez, M. (2005). *Análisis de la influencia de los parametros de proceso en la simulación de termoformación de plásticos con T-SIM* [Universidad Autónoma de Occidente]. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/7562/T05567.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Schmidt, L., & Carley, J. (1975). *Biaxial stretching of heat-softened plastic sheets: Experiments and results*. 15(1). [https://www.researchgate.net/publication/278320899\\_Sheeting](https://www.researchgate.net/publication/278320899_Sheeting)

- Selcuk, E., & Olcay, E. (2013). *Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds*. 195-202. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1486>
- Skiba, Y. (2005). *Metodos Y Esquemas Numericos: Un Analisis Computacional*. UNAM.
- Throne, J. (2011). Thermoforming. En M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook* (pp. 333-358). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10019-4>
- Throne, J. (2017). Chapter 6 Thermoforming. En M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)* (pp. 345-375). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00016-X>
- Throne, J. L. (2001). *Understanding Thermoforming* (2da ed.). Hanser. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032339040800016X>
- Torres, F. (2000). *Reología de polímeros: Parte I. Nociones básicas y modelos reológicos*. XIV. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/4714/4718/>
- Villarreal, C. de A. (2009). *Estudio de la modificación de la estructura morfológica de un HIPS en función de la variación de la arquitectura del copolímero PBd-g-PS*. Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Williams, J. G. (1970). A method of calculation for thermoforming plastics sheets. *Journal of Strain Analysis*, 5(1), 49-57. <https://doi.org/10.1243/03093247V051049>
- Wooldridge, J. (1985). *Polymer process modeling: Thermoforming of simple objects via finite element analysis* [Thesis, University of Louisville]. <https://uofl.on.worldcat.org/search/detail/13685582?databaseList=638&queryString=Polymer%20Process%20Modeling%3A%20Thermoforming%20of%20Simple%20Objects%20via%20Finite%20Element%20Analysis>
- Zingoni, A. (2016). *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. CRC Press. [https://books.google.com.ec/books?id=Pdm\\_DQAAQBAJ&pg=RA5-](https://books.google.com.ec/books?id=Pdm_DQAAQBAJ&pg=RA5-)

PA1939&lpq=RA5-

PA1939&dq=modelo+kbkz+polyflow&source=bl&ots=3\_YzHIVjta&sig=ACfU3

U0mhhEktc7FJ4CXkoTTZq2YaeFYw&hl=es-

419&sa=X&ved=2ahUKEwjN1OaDndL1AhX1RTABHczlA10Q6AF6BAgaEAM

#v=onepage&q=modelo%20kbkz%20polyflow&f=false

## 12. Apéndices

### 12.1. Apéndice 1

Los valores de  $F_Z$  en el rango  $Z_T \leq Z \leq \frac{H}{\sin \beta}$  pueden calcularse y sustituirse en la Ec. 11 de la siguiente manera:

$$F_Z = \left( \frac{aZ^2 + bZ + c}{aZ_T^2 + bZ_T + c} \right)^{\frac{f \sin \beta}{2a(2-f)}} \cdot \left( \frac{(2aZ + b - g)(2aZ_T + b + g)}{(2aZ_T + b - g)(2aZ + b + g)} \right)^{\frac{\sin \beta (d - \frac{fb}{2a})}{g(2-f)}}$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= \sin \beta - \beta \\ b &= \beta \left( \frac{H}{\sin \beta} + Z_T \right) - 2H \\ c &= (H - Z_T \beta) \frac{H}{\sin \beta} \\ d &= \frac{L}{2} - Z_T - H \left( \frac{1}{\tan \beta} - \cos \beta \right) \\ f &= 1 - \cos \beta \\ g &= \sqrt{b^2 - 4ac} = \beta \left( \frac{H}{\tan \beta} - \frac{L}{2} \right) \end{aligned}$$

### 12.2. Apéndice 2

Los valores de  $F_X''$  en el rango de  $X_T \leq X \leq M$  pueden ser calculados y substituidos en la Ec. 22 de la siguiente manera:

$$F_X'' = \left( \frac{aX^2 + bX + c}{aX_T^2 + bX_T + c} \right)^{\frac{f \sin \beta}{2a(2-f)}} \cdot \left( \frac{(2aX + b - g)(2aX_T + b + g)}{(2aX_T + b - g)(2aX + b + g)} \right)^{\frac{\sin \beta (d - \frac{fb}{2a})}{g(2-f)}}$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= \sin \beta - \beta \\ b &= \beta \left( \frac{H}{\sin \beta} + X_T \right) - 2(H + X_T \sin \beta) \\ c &= \left( \frac{H}{\sin \beta} - X_T \right)^2 \sin \beta \\ d &= \frac{L}{2} - X_T \cos \beta \\ f &= 1 - \cos \beta \\ g &= \sqrt{b^2 - 4ac} = \beta \left( \frac{H}{\sin \beta} + X_T \right) \end{aligned}$$

## 13. Anexos

### 13.1. Script en Matlab para el MEG

```
clc
clear
clear all
d0=input('espesor inicial');
H=input('profundidad del molde');
L=input('diámetro mayor del molde');
bb=input('angulo entra la pared y diámetro mayor');
B=bb*pi()/180;
syms X

comprobacion=(L/2)*(1-cos(B))/sin(B); % calculo necesario para
verificar si el molde es PROFUNDO ó POCO PROFUNDO

%CALCULO PARA MOLDES POCO PROFUNDOS
if H<comprobacion
    XT=(L/2-(H*(1+cos(B)))/(sin(B))); % (corregido el signo menos)
    distancia en el techo donde la burbuja entra en contacto de manera
    tangencial con la pared del molde
    f=X/(2*pi())*((1/(2*H))*(H/sin(B))^2+(L/2-H/(tan(B))-
X)^2+(2*H/tan(B))*(L/2-H/(tan(B))-X))*X*(pi()/2-asin(1-
H/((1/(2*H))*((H/sin(B))^2+(L/2-H/(tan(B))-X)^2+(2*H/tan(B))*(L/2-
H/(tan(B))-X))))+H));
    d1=d0*(L^2/(L^2+4*H^2)); % espesor de en el centro del molde
    R0=(1/(2*H))*((H/sin(B))^2+(L/2-H/(tan(B)))^2+(2*H/tan(B))*(L/2-
H/(tan(B))))); %radio de burbuja en el instante que va a entra en
contacto con el fondo del molde
    S1=2*pi*H*R0; %superficie de la burbuja en el instante en que va a
    entrar en contacto con el molde
    for e=1:XT
        R=(1/(2*H)).*((H/sin(B)).^2+(L/2-H/(tan(B))-
e).^2+(2*H/tan(B)).*(L/2-H/(tan(B))-e));%radio de la burbuja antes de
    entrar en contacto tangencial con la pared del molde
        S=2.*pi().*R.*(e.*(pi()./2-asin(1-H./R))+H); %superficie de la
    burbuja antes de entrar en contacto tangencial con la pared del molde
        d11(e)=S1*d1/(S*(exp(2*pi*(int(f,X,0,e))))); %espesor desde
    el centro del molde hasta que la burbuja entra en contacto tangencial
    con la pared del molde
        n=double(d11);
    end

    RR=(1/(2*H)).*((H/sin(B)).^2+(L/2-H/(tan(B))-
XT).^2+(2*H/tan(B)).*(L/2-H/(tan(B))-XT));
    SS=2.*pi().*R.*(XT.*(pi()./2-asin(1-H./R))+H);
    d111=S1*d1/(S*(exp(2*pi*(int(f,X,0,XT)))));
    nn=double(d111);
    YY1=[d1,n,nn];
    A=0:1.0:XT;
    XX1=[A,XT];

    Q=H/tan(B);
    XXTT=L/2-Q; %radio del techo del molde
    SS11=(2*pi()*H)/(1-cos(B))*(XT*B+H); % corregido el signo
menos
    p=cos(B);
    w=fix(XT);
    XTT=w+1;
```



```

l=H/sin(B);
h=l*sin(B/2);

for i=XTT:XXTT

    R2=(h-(i-XTT+(XTT-XT))*sin(B/2))/(sin(B/2)*tan(B/2)); %radio
de la burbuja desde que entra en contacto tangencial con la pared del
molde
    SSS=2.*pi().*R2.*(i.*B+(L./2-H./tan(B)-i).*sin(B));
%superficie de la burbuja desde que entra en contacto tangencial con
la pared del molde

    % espesor en radio
    a=sin(B)-B; %constante para calcular Fxx
    b=B*(H/sin(B)+XT)-2*(H+XT*sin(B)); %constante para calcular
Fxx
    c=(H/sin(B)+XT)^2*sin(B); %constante para calcular Fxx
    d=L/2+XT*cos(B); % (se cambió el signo más por el menos)
constante para calcular Fxx
    f=1-cos(B); %constante para calcular Fxx
    g=sqrt(b^2-4*a*c); %constante para calcular Fxx
    Fxx=((a*(i)^2+b*i+c)/(a*XT^2+b*XT+c))^(f*sin(B)/(2*a*(2-
f)))*(2*a*i+b-g)*(2*a*XT+b+g)/((2*a*XT+b-
g)*(2*a*i+b+g))^(sin(B)*(d-f*b/(2*a)))/(g*(2-f)));

    d2(i)=(nn.*SS11)./(SSS.*Fxx); %espesor justo después de
n1=double(d2);

end
floor(XT);
floor(XTT);
n1(1:XT)=[];
A2=XTT:1.0:(XXTT);
XX=[A,XT,A2];
YY=[d1,n,nn,n1];
plot(XX,YY)
title('Molde poco profundo')
xlabel('distancia [mm]')
ylabel('espesor de pared [mm]')

% CALCULO PARA MOLDES PROFUNDOS >
else H>comprobacion
    Q=H/tan(B);
    Rt=L/2-Q; %radio del techo del molde
    h=L/2*tan(B);
    ZT=H*(1+cos(B))/sin(B)-L/2;
    R=(h-ZT*sin(B))/(sin(B)*tan(B));
    zt=fix(ZT);
    XX=0:1.5:ZT;
    d1=d0*(1+cos(B))/2*((H-XX*sin(B))/H).^(sec(B)-1);
    d11=d0*(1+cos(B))/2*((H-ZT*sin(B))/H).^(sec(B)-1);
    S1=2*pi().*(1+cos(B))*(H/sin(B)-ZT)^2; %superficie de la burbuja al
entrar en contacto con el techo del molde

    % constantes para calcular Fz
    a=sin(B)-B; %constante para calcular Fxx
    b=B*(H/sin(B)+ZT)-2*H; %constante para calcular Fxx
    c=(H-ZT*B)*H/sin(B); %constante para calcular Fxx
    d=L/2-ZT-H*(1/tan(B)-cos(B)); % (se corrigió el signo más por el
menos) constante para calcular Fxx

```

```

f=1-cos(B); %constante para calcular Fxx
g=sqrt(b^2-4*a*c); %constante para calcular Fxx
syms i
i=ZT:1.5:(H/sin(B));
S=(2.*pi()/(1-cos(B))).*(H-i*sin(B)).*((i-ZT).*B+(H-i.*sin(B)));
Fz=((a.*(i).^2+b.*i+c)./(a*ZT.^2+b.*ZT+c)).^(f.*sin(B)/(2.*a.*(2-
f))).*((2.*a.*i+b-g).*(2*a*ZT+b+g)./((2.*a.*ZT+b-
g).*(2.*a.*i+b+g))).^((sin(B).*(d-f.*b/(2.*a)))./(g.*(2-f))));
d111=d11.*S1./(S.*Fz);
x=[XX,i];
y=[d1,d111];
x1=(H/sin(B)+Rt):-1.5:(H/sin(B));
y1=d111;
x2=[XX,i];
y2=[d1,d111];
x3=(H/sin(B)+Rt):-1.5:(H/sin(B));
y3=d111;
XX1=[x,x1];
YY1=[y,y1];
XX2=[x2,x3];
YY2=[y2,y3];

plot(XX2,YY2,'*')

title('Análisis por elementos geométricos')
xlabel('Distancia [mm]')
ylabel('Espesor de pared [mm]')

end

```



# Guía de programación

# **Modulo Polyflow**

Proceso de termoformado

Guía de programación del módulo Polyflow para  
predecir el espesor de pared en el proceso de  
termoformado

## 1. Geometría

Para las geometrías del molde y preforma es necesario generar las superficies de contacto (SC), si se tiene los sólidos de cada cuerpo será necesario extraer cada una de las SC del sólido y generar un solo cuerpo de superficie, en la (Figura 42) Se puede apreciar 3 SC más 2 superficies generadas por los radios se tendrá un total de 5 SC para el molde; para el film se tiene solo 1 SC que sería la que va a entrar en contacto con el molde.

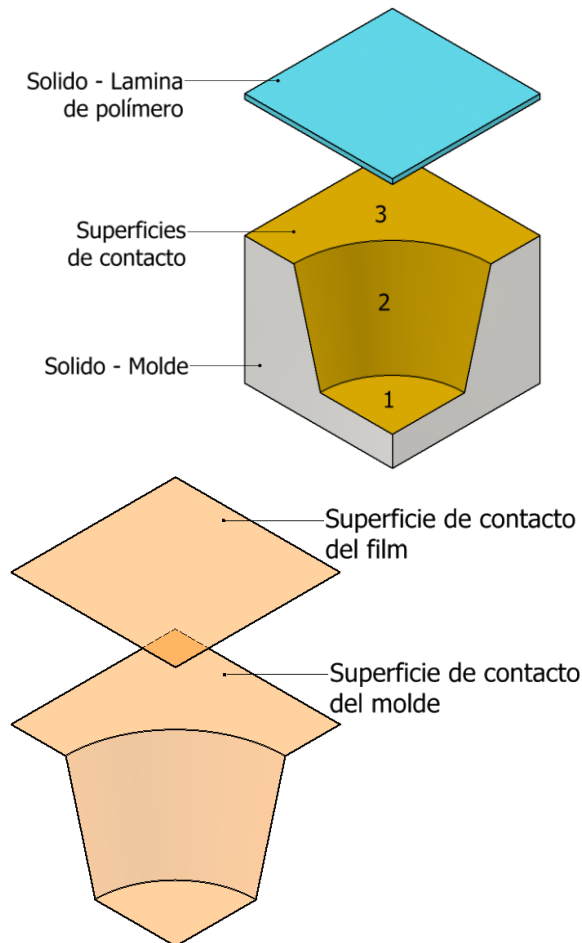


Figura 42: Superficies de contacto del molde y film.

Fuente: Autor.

Para generar estas geometrías el módulo dispone de 2 opciones de modelado, en el menú Fluid Flow (Polyflow) damos clic derecho sobre la opción **Geometry** y se despliegan las opciones de editor de geometría **Edit geometry in DesignModeler** o **Edit geometry in SpaceClaim**.

### 1.1. Importar geometría

Si en caso las geometrías se han generado en otro programa de modelado, se puede importar desde un archivo ubicado en la PC dando clic derecho sobre la opción **Geometry** del menú de sistema de análisis **Fluid Flow (Polyflow)**, desplazamos el cursor hasta la opción **Import**

**geometry** y automáticamente se despliega las opciones para importar el archivo como se puede observar en la (Figura 43).

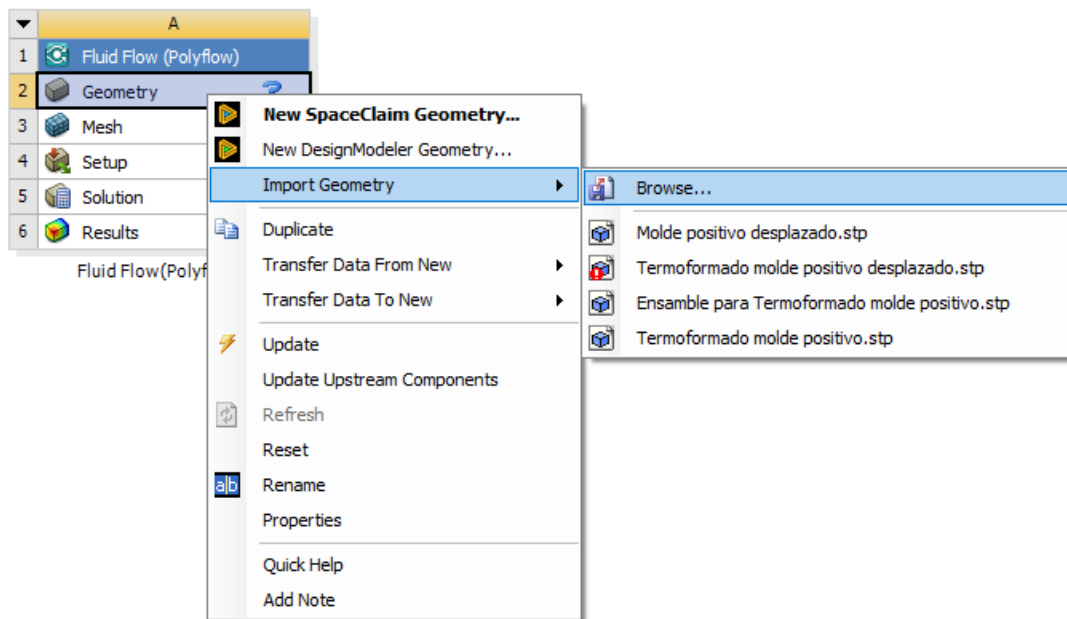



Figura 43: Proceso para importar una geometría desde la memoria del equipo.  
Autor: Polyflow

Una vez importado el archivo nuevamente damos clic derecho sobre la opción **Geometry** y escogemos la opción **Edit Geometry in DesignModeler**, de esta manera estamos abriendo la herramienta de modelado. Luego se abre la ventana para modelado en 3D, damos clic en **Generate** representado por el icono  para que se genere el modelo importado, o tambien podemos presionar la tecla F5.

## 1.2. Nombrar bordes

Es necesario asignar un nombre a cada uno de los bordes de la preforma como se muestra en la (Figura 44), ya que más adelante necesitamos especificar la función que cumple cada uno de ellos.

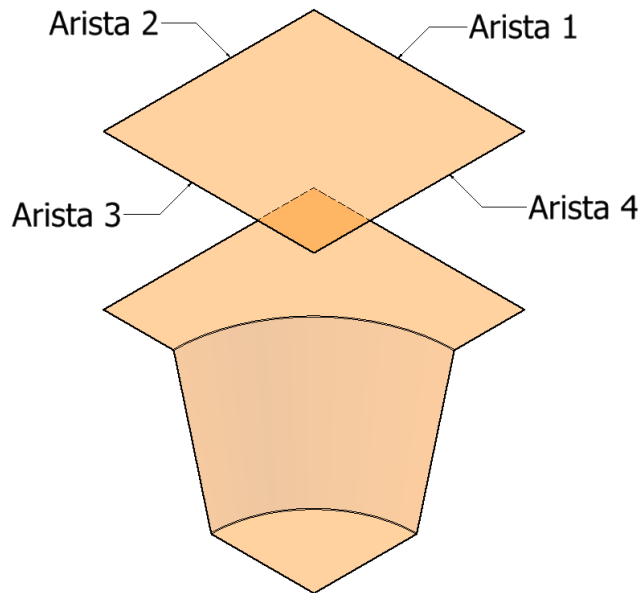

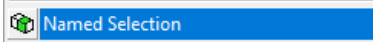


Figura 44: Ejemplo de cómo nombrar a las aristas de la preforma.

Fuente: Autor.

Escogemos la opción de **Selection Filter: Edges** representado por el icono , seleccionamos una arista, damos clic derecho sobre la misma y escogemos la opción



luego en el lado izquierdo de la pantalla se despliega el menú Details View en donde asignaremos el nombre de cada una de las aristas de la preforma, seguidamente en el menú Tree Outline damos clic derecho sobre la arista generada y escogemos la opción **Generate** como se puede observar en la (Figura 45) para que el programa genere la arista con el nombre antes indicado, esto se debe realizar aleatoriamente para cada arista.

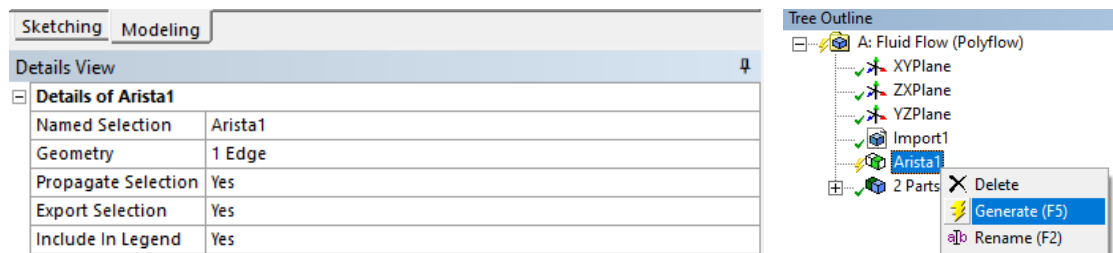


Figura 45: Menús de Details View y Tree Outline.

Autor: Polyflow

Una vez asignado el nombre a cada una de las aristas de la preforma cerramos la ventana de DesignModeler.

## 2. Mallado

El mallado cumple una función diferente en cada una de las 2 superficies, en el molde servirá para indicar al programa cuál va a ser la superficie de contacto entre la lámina y molde, no estará sometida a deformación, por lo tanto, no entrará en un análisis de fluido y podremos ocupar el mallado por defecto que carga el programa automáticamente. Por otro lado, el mallado de la preforma estará sometido a deformación por lo que este si entrara en análisis

de fluido, puesto que sobre ella se aplicará un cierto valor de presión, lo que generará el termoformado; se puede ocupar las diferentes opciones de malla que nos brinda el programa y se puede partir empleando el modelo de superficies cuadradas. Para verificar como se adapta la malla en la figura termoformada, será necesario completar el proceso y verificar los resultados en el postprocesador, solo así podremos verificar si será necesario cambiar el tipo de malla o tamaño de elemento. Para entrar a la configuración de mallado en el menú Fluid Flow (Polyflow) damos doble clic sobre la opción **Mesh**, a continuación, se abrirá una nueva ventana en donde podremos configurar el mallado para cada subdominio; para generar el mallado por defecto, en el menú Outline damos click derecho sobre **Mesh**, seleccionamos la opción **Generate Mesh** y luego la opción **Update**, en la (Figura 46) se puede observar los pasos antes indicados.

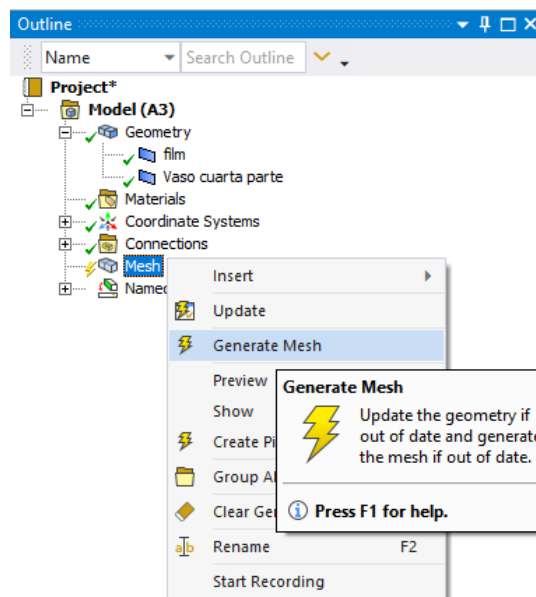


Figura 46: Pasos para generar el mallado.  
Fuente: Polyflow.

Para finalizar, luego de haber realizado los pasos antes mencionados cerramos la ventana de configuración de malla.

### 3. Configuración

En esta sección vamos a indicar al programa cuáles son los parámetros de frontera, como:

- Espesor inicial de la lamina
- Datos de materiales
- Tipo de molde
- Presión de vacío
- Tiempo de ciclo

En la sección de configuración se tiene tres pasos principales:

- 1) Crear tarea para la solución mediante F.E.M
- 2) Definir el molde
- 3) Crear una sub tarea para la preforma
- 4) Definir el material de la preforma
- 5) Configurar parámetros numéricos para llegar a la convergencia de la solución.

Para entrar a este menú de configuración debemos dar doble clic sobre la opción **Setup** del menú de sistema de análisis Fluid Flow (Polyflow), a continuación de abrirá la ventana llamada Polydata la cual se expone en la (Figura 47) para la configuración de método de elementos finitos (F.E.M).

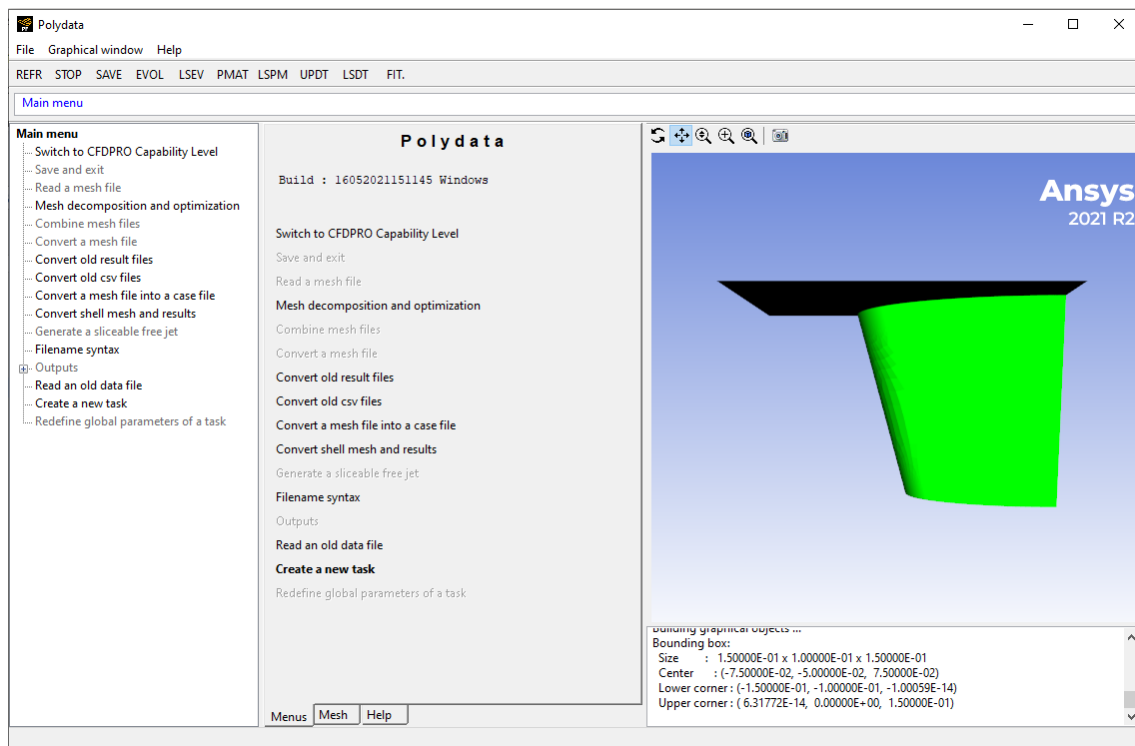


Figura 47: Ventana de la herramienta Polydata.  
Fuente: Polyflow.

### 3.1.1. Crear tarea para la solución mediante FEM

Damos clic en **Create a new task** y seleccionamos las siguientes opciones:

- **F.E.M. task**
- **Time-dependent problem(s)**
- **2D shell geometry**

De esta manera indicamos al programa que: la tarea se va a realizar por el método de elementos finitos, una de sus variables independientes va a ser el tiempo y el estudio se lo realizara en 2D; luego damos clic en **Accept the current setup** para aceptar las opciones de configuración antes marcadas, automáticamente entraremos al menú de la nueva tarea denominada F.E.M. Task 1 la cual se indica a continuación en la (Figura 48).



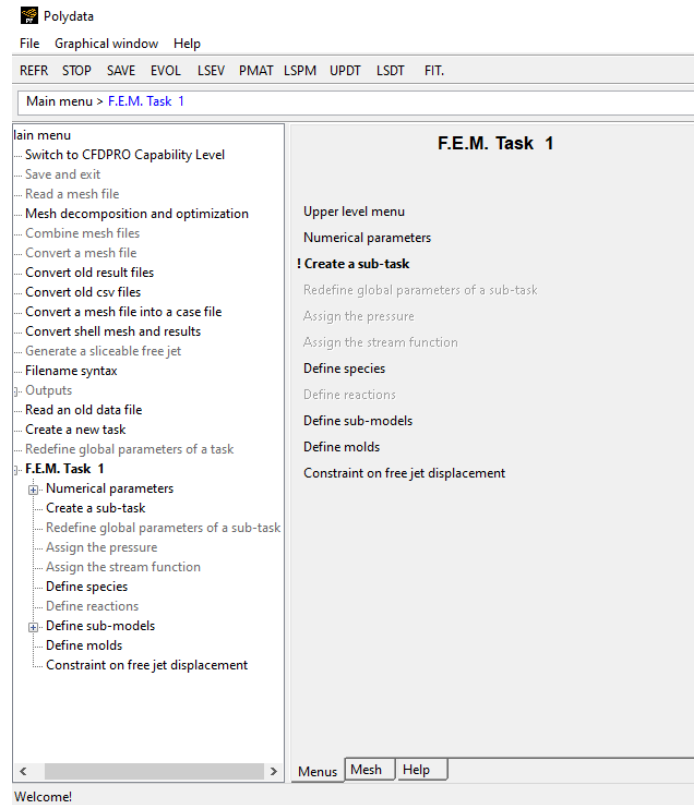


Figura 48: Menú de la tarea F.E.M.  
Fuente: Polyflow.

### 3.1.2. Definir el molde

Para cargar los parámetros del molde en el menú de F.E.M. Task 1 seleccionamos **Define molds** → **Create a new mold** → **Adiabatic mold**, con esta selección indicamos al programa que el molde no tiene temperatura y que no abra intercambio de calor entre este y la lámina o exterior, en la sección de New value ingresamos el nombre que le vamos a colocar al molde, en este caso asignaremos el nombre de **Molde 1** como se muestra en la (Figura 49) o podemos dejar el que está cargado por defecto y luego damos clic en **OK**.

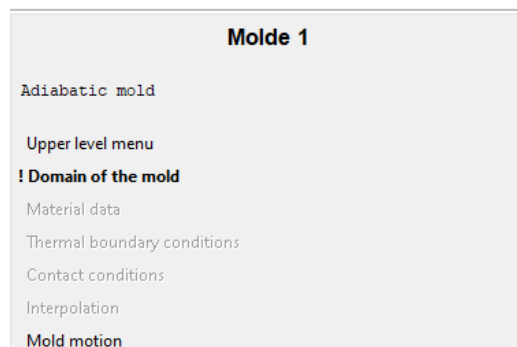


Figura 49: Menú del molde generado.  
Fuente: Polyflow.

Posteriormente, debemos indicar al programa cuál de las 2 superficies es el molde, para esto damos clic en **Domain of the molde**, se abre una ventana en donde podemos notar que el

programa está reconociendo a cada cuerpo con el nombre de **matid\_#**, ahora debemos reconocer el cuerpo al que pertenece cada nombre, en la lista superior debe quedar el molde y en la inferior la preforma, con la opción **Remove** podemos remover los cuerpos de una lista a otra. Luego regresamos al menú anterior dando clic en **Upper level menú**; ahora debemos indicar si el molde va a tener contacto con el film o no, para ello seleccionamos la opción **Contact condition**, nos va a aparecer la opción que también la vamos a seleccionar **No contact along matid\_#**, vamos a dar clic en **Modify** → **Contact** y luego vamos a dar clic en la opción **Upper level menú** para regresar al menú anterior. El siguiente paso es indicar el movimiento del molde, para esto damos clic en **Mold motion**, luego se muestra una ventana indicando las opciones para el movimiento con su respectivo número de opción:

- 1) Fixed mold
- 2) Translation velocity imposed
- 3) Translation force imposed

Se puede escribir la opción **2** para indicar al programa que el movimiento del molde va a ser por una velocidad impuesta, damos clic en **OK**. Luego en las pestañas de la ventana polydata en la parte superior damos clic en **EVOL** de manera que se quede marcada, al habilitar esta opción estamos ordenando al programa que nos permita indicar la evolución que va a tener el movimiento del molde en el transcurso del tiempo, si no activamos esta pestaña el programa no permitirá que se muestren las opciones que vienen a continuación. Damos clic en **Modify translation velocity**, ahora se mostrará una ventana en donde podremos ingresar la velocidad que va a tener el molde en el eje de coordenadas que nosotros asignemos, una vez que ingresemos el valor de velocidad damos clic en **OK**; ahora se desplegará un nuevo menú por consecuencia de haber habilitado las opciones de evolución EVOL como se puede observar en la (Figura 50) las opciones que se muestran a continuación es para ingresar mediante funciones del tiempo el comportamiento que va a tener el molde para moverse.

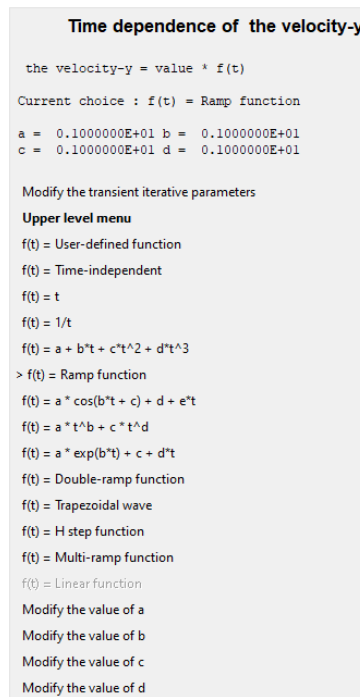


Figura 50: Opciones de evolución para configurar el movimiento del molde.  
Fuente: Polyflow.

Un comportamiento habitual es el de tipo rampa en donde podemos asignar 2 estados: que inicie con movimiento y que luego pare, por ejemplo:

Si anteriormente asignamos una velocidad del molde de 0.010 m/s y queremos que el molde avance en esa velocidad por 0.7 segundos y luego baje la velocidad gradualmente hasta detenerse a los 0,8 segundos, en la (Figura 51) se indica la gráfica de la función con los valores antes mencionados

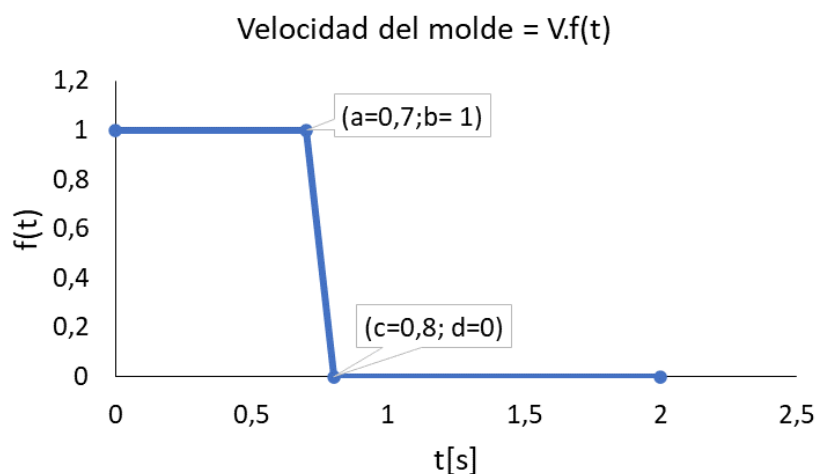


Figura 51: Gráfica de la función rampa.  
Fuente: Autor.

Una vez ingresado los valores de la función de rampa damos clic en **Upper level menú** para regresar al menú anterior, ahora desactivamos las opciones de **EVOL** y nuevamente damos clic en **Upper level menú** hasta regresar al menú de **F.E.M. Task 1**.

#### 3.1.2.1. Crear una subtarea para la preforma

En el menú **F.E.M Task 1** damos clic en la opción **Create a sub-task**, seleccionamos la opción de modelo **Gen. Newtonian isothermal**, se muestra una ventana en donde podemos ingresar el nombre de la sub tarea, en nuestro caso podemos ocupar el nombre de **Preforma**, damos clic en **OK**.

Al igual que en la configuración del molde vamos a indicar al programa cuál de las superficies es la que corresponde al film o preforma, damos clic en **Domain of the sub-task**, ahora debemos de indicar en la primera lista la preforma o film, el elemento que no corresponde al film debemos removerlo con la opción **Remove**, luego de esto volvemos al menú anterior dando clic en **Upper level menú**. El siguiente punto es muy importante porque indicaremos al programa la función que cumple cada arista de la preforma; en este caso se ha ocupado para el análisis un cuarto de geometría, debido a que la pieza es simétrica en sus 2 ejes principales, por lo que 2 aristas estarán representando el eje de simetría (Arista 3 y 4) para la proyección de la pieza y las otras dos aristas (Arista 1 y 2) representan los lados en los cuales está sujeta la preforma por las pinzas o mordazas, asignaremos esta condición declarando las 2 aristas con velocidad cero. Damos clic en la opción **Flow boundary conditions**, se despliega un menú indicando que las 4 aristas tienen  $v_n=v_s=0$  (velocidad cero), para las aristas 1 y 2 vamos a dejar su configuración por defecto, para las aristas 3 y 4 vamos a hacer lo siguiente: daremos clic sobre 1 de ellas y luego daremos click en **Modify** en la parte inferior de la ventana, luego daremos clic en **Plane of simmetry (fs=0 vn=0)**, y luego seleccionaremos a lo largo de que eje será la proyección normal del cuarto de lámina y repetiremos lo mismo para la otra arista.

Damos clic en **Upper level menu** para regresar al menú de **Flow boundary conditions**, ahora ingresaremos la presión de vacío, dando clic en el recuadro que esta a lado de **Inflation pressure imposed**, el programa nos da la opción de configurar la presión como: constante o en la dirección de algunos ejes, en nuestro caso daremos click en **Constant**, en la parte derecha se puede apreciar la dirección de los dardos sobre la preforma, si estos están en la dirección necesaria se debe ingresar la presión positiva o caso contrario con signo negativo. Si la presión va a ser una función del tiempo, como el movimiento del molde, entonces se debe realizar el mismo procedimiento que se realizó para asignar el movimiento al molde,

desde que se activan las opciones de evolución EVOL hasta definir los valores para la función de rampa. Una vez configurado la presión de vacío, regresamos al menú anterior al que asignamos el nombre de **Preforma**; ahora daremos clic en la opción **Define contacts**, en este menú vamos a crear un nuevo problema de contacto en el cual se va a indicar la superficie con la que va a entrar en contacto la lámina al deformarse por la presión de vacío; damos clic en **Create a new contact problem**, seleccionamos la opción **Select a contact wall** y seleccionamos el molde como pared de contacto, lo demás parámetros quedan asignados por defecto como se indica en la (Tabla 14).

Tabla 14: Parámetros del problema de contacto

Parámetros de contacto	
Slipping coefficient.	1e+09
Penalty coefficient	1e+09
Penetration accuracy	0.0002 [m]

Fuente: Polyflow.

Ahora debemos definir la orientación del molde dando clic en **Specify mold side / cavity side**; puede ampliar la vista del molde para asegurarse de que puede ver los dardos que se mostrarán. Alternativamente, puede aumentar el tamaño de los dardos con la ayuda de las opciones de la ventana Polydata, dando clic en **Graphical window → Sizing Darts → Size up**. Haga clic en **No** en el panel que se abre, para especificar que los dardos no apunten hacia el cuerpo del molde; damos clic dos veces sobre **Upper level menú** y se abre un panel de advertencia que indica que la predicción de velocidad debe desactivarse y que la modificación se ha realizado automáticamente, damos clic en **OK**.

### 3.1.3. Definir el material de la preforma

En el menú que anteriormente se creó con el nombre de Preforma seleccionamos la opción **Define layers**, a continuación, seleccionamos **Create a new layer**, se despliega una ventana en donde podemos ingresar el nombre de **Polímero** como se indica en la (Figura 52) o cualquier nombre que sea de nuestra utilidad.

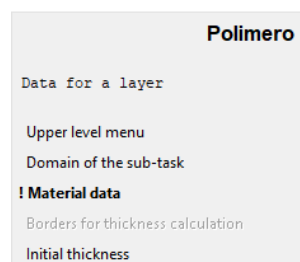


Figura 52: Menú de la nueva capa creada con el nombre Polímero.

Fuente: Polyflow.

Para indicar el espesor inicial del material damos click en **Initial thickness**, luego seleccionamos la opción **Constant** para indicar que el espesor de la lámina es constante, en la ventana que ahora se despliega ingresamos el valor en unidades métricas y luego damos clic en **OK**. Regresamos al menú de Polímero dando clic en **Upper level menú**, ahora seleccionaremos la opción **Material data** y se mostrara un nuevo menú el cual se indica en la (Figura 53).

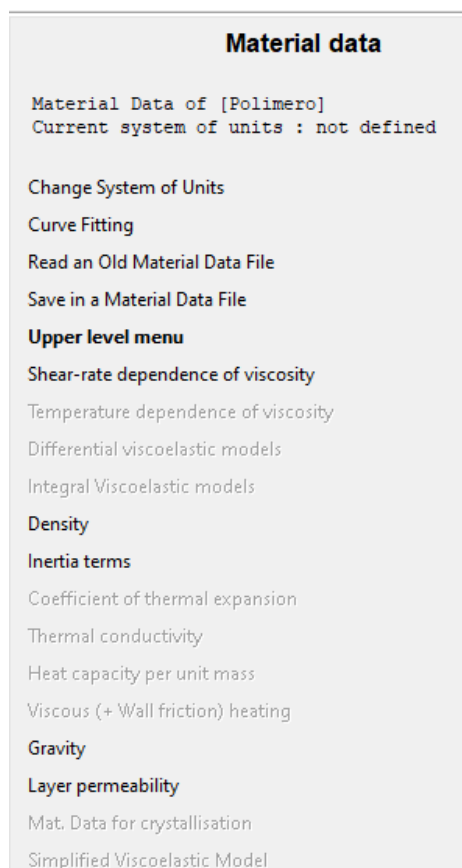


Figura 53: Menú de la sección Material data.  
Fuente: Polyflow.

Damos clic en la opción de **Curve Fitting** y se abrirá una nueva ventana perteneciente a la herramienta Polymat como se observa en la (Figura 54), aquí podemos cargar los datos obtenidos por los ensayos reológicos y escoger el modelo al que mejor se ajustan los puntos para describir el comportamiento del material

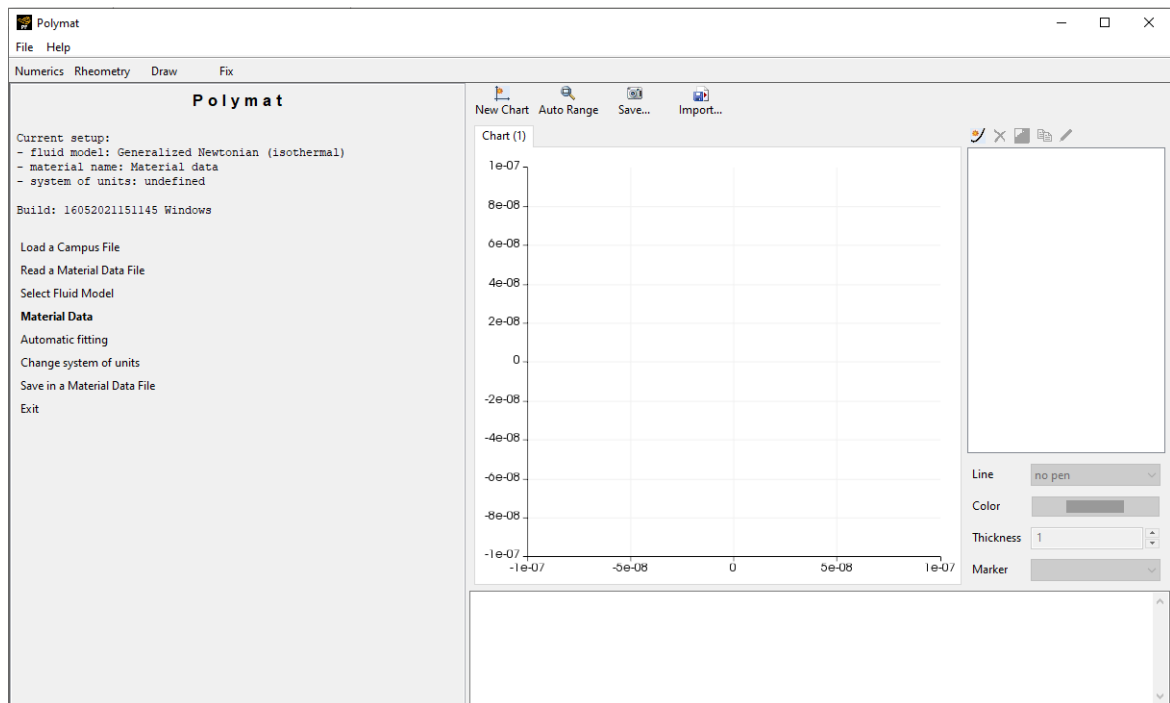




Figura 54: Ventana de la herramienta para ajuste de curvas Polymat.  
Fuente: Polyflow.

Como primer paso para el uso de esta herramienta debemos cargar los datos obtenidos por el ensayo reológico dando clic en el siguiente icono , en la nueva ventana ingresaremos los valores del ensayo, damos clic en **OK** y automáticamente se generan el nombre de Curve1 para los datos antes ingresados, damos click sobre el nombre de Curve1 y guardamos dando clic en el siguiente icono , guardaremos los datos antes ingresados con el nombre que nosotros queramos asignar en formato crv. Ahora daremos clic en la opción **Material Data** y a continuación daremos clic en **Shear-rate dependence of viscosity**, aquí seleccionaremos el modelo reológico que necesitamos que se acople a los puntos antes ingresados, una vez seleccionado el modelo se muestran los coeficientes del modelo que se van a obtener mediante el ajuste de curva, damos clic en **Upper level menú** hasta volver al menú de Material Data, seguidamente seleccionamos la opción de **Density**, luego damos clic en **Modify the density** y ahora ingresamos el valor de la densidad del polímero en unidades de  $\text{kg/m}^3$ , damos clic en **OK**. Regresamos al menú de Polymat dando clic en **Upper level menú**, seleccionamos la opción de **Automatic fitting** → **Add experimental curves** → **Add new curve** → **Enter the name of the curve file** y se abre la ventana de explorador de archivos, indicamos que busque todos el tipo de formato de archivo y ahora abrimos el archivo que anteriormente guardamos con los datos del ensayo reológico; ahora damos clic en **Upper level menú** hasta llegar al menú de **Automatic Fitting**, damos clic en **Draw**

**experimental curves** para qué aparezcan los puntos en el plano, finalmente damos clic en **Run fitting** para que se genere el ajuste de curva; luego damos clic en **Upper level menú** → **Exit**, se despliega un mensaje preguntando si deseamos salir del menú Polymat, damos click en **Si**, luego se despliega un mensaje preguntando si deseamos actualizar los datos en Polydata, damos clic en **Si** para que se carguen automáticamente en nuestra configuración de material los coeficientes de los modelos reológicos calculados mediante el ajuste de curvas. Posteriormente regresamos al menú de Material Data y seleccionamos la opción **Inertia terms** → **Inertia will be taken into account**, de esta manera indicamos que se deben tomar en cuenta los términos de inercia, volvemos al menú Material Data y damos clic en **Gravity**, ahora podemos ingresar el valor de la gravedad en cualquiera de los 3 ejes coordenados en unidades de  $m/s^2$

### 3.1.4. Configurar parámetros numéricos para llegar a la convergencia de la solución

En el menú F.E.M. Task 1 del Polydata damos clic en **Numerical parameters** → **Modify the transient iterative parameters**, a continuación, se puede observar que ya se encuentran cargados valores por defecto, en la (Tabla 15) se indica la función de cada valor en el caso que se necesite modificar una de ellas.

Tabla 15: Descripción y función de los parámetros de iteración.

Descripción	Función
Initial time value	Valor de tiempo en el cual va a empezar el análisis
Upper time limit	Límite de tiempo al que va a llegar el análisis
Initial value of the time-step	Incremento inicial del tiempo.
Minimum value of the time-step	Mínimo incremento del tiempo al que se puede reducir para generar el análisis
Maximum value of the time-step	Máximo incremento del tiempo al que se puede reducir para generar el análisis
Maximum number of successful steps	Máximo número de incrementos que se obtienen en el análisis

Fuente: Autor.

Una vez realizado todos los pasos anteriores damos clic en **Upper level menú** varias veces hasta el menú Polydata, luego seleccionamos las opciones **Save and exit** → **Modify system of Units** aquí vamos a indicar que el sistema de unidades empleado es **Set to metric\_MKSA+Celsius** → **Upper level menú** → **Upper level menú** → **Accept** → **Continue**.

### 3.1.5. Solución

Si se cumplió todos los pasos indicados anteriormente nos aparecerá el menú Fluid Flow (Polyflow) como se muestra en la (Figura 55).



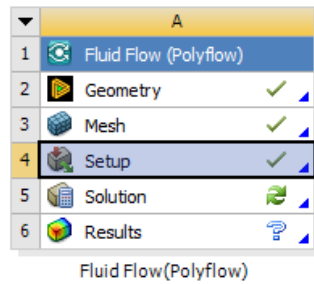




Figura 55: Menú del módulo Polyflow antes de generar la solución.  
Fuente: Polyflow.

Damos clic derecho sobre la opción **Solution** y seleccionamos **Update**, de esta manera el programa comenzará a realizar los cálculos para obtener una solución.

### 3.1.6. Resultados

Para el análisis de resultados damos doble clic sobre la opción **Results** y automáticamente se abrirá la la ventana de CFD-Post; para aplicar el contorno de colores en función de los espesores de pared, en la lista desplegable identificamos el archivo que corresponde a la preforma, el módulo normalmente lo reconoce con el nombre de **matid\_#\_surf**, una vez identificada vamos a dar doble clic sobre esta y en la parte inferior aparecerá el menú Details, en la opcion Mode vamos a seleccionar **Variable**, a continuación se despliega en la parte de abajo nuevas opciones, en la opción Variable vamos a seleccionar **THICKNES** y luego **Apply**.

Para observar la animación del proceso en diferente tiempo en la parte superior de la ventana CFD-Post identificamos la opción Animation representado por el icono , en la nueva ventana en la seccion Type escogemos la opcion **Timestep Animation**, de esta manera podemos desplazarnos a cualquier tiempo de la solucion.

Para verificar el espesor de pared en un punto específico de la pieza podemos usar la opción Probe representado por el icono  y luego dar clic en cualquier punto de la pieza.