



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA
GUTIÉRREZ**
DEPARTAMENTO DE METAL-MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA



REPORTE DE RESIDENCIA PROFESIONAL

TEMA:

**DISEÑO CON EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO DE SISTEMA
DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO DE MÁQUINA SOLAR
ECOLÓGICA PARA PROCESAR PRODUCTOS DE PLÁSTICO.**

ROTOINNOVACIÓN SA DE CV

ASESOR INTERNO:

DR CARLOS RÍOS ROJAS

ASESOR EXTERNO:

ING. LEONARDO DANIEL ZAPATA HERNÁNDEZ

PRESENTA:

GUILLERMO JOSÉ CAMERAS HAU

NUMERO DE CONTROL:

10270747

Índice

Capítulo 1: Marco de referencia	pág.
1.1 Introducción	4
1.2 Objetivo general	6
1.3 Objetivos específicos	6
1.4 Características técnicas esperadas	7
1.5 Funcionamiento del sistema	8
1.6 Caracterización del área en que participó	9
1.6.1 Rotoinnovación SA de CV	9
1.6.2 Misión.....	9
1.6.3 Visión	9
Capítulo 2: Marco teórico	
2.1 Sistema de rotomoldeo	10
2.1.1 El rotomoldeo	10
2.1.2 Ventajas	12
2.1.3 Aplicaciones.....	13
2.1.4 El proceso del rotomoldeo	13
2.1.5 Llenado del molde	14
2.1.6 Calentamiento del molde	14
2.1.7 Enfriamiento del molde	15
2.1.8 Vaciado del molde	15
2.1.9 Técnicas de procesos de rotomoldeo	16

2.1.10 Tipos de máquinas	17
2.1.10.1 Hornos	18
2.1.10.2 Flama abierta	18
2.1.11 Matrices para rotomoldeo	19
2.1.11.1 Tipos de matrices	19
2.1.11.1.1 Acero inoxidable	19

Capítulo 3: resultados

3.1 Calentamiento.....	20
3.1.2 Preproceso	20
3.1.2.1 Geometría	20
3.1.2.2 Materiales	21
3.1.2.3 Física	22
3.1.2.4 Ecuaciones	22
3.1.2.4.1 Ecuaciones de corriente eléctrica	22
3.1.2.4.2 Ecuaciones de transferencia de calor	23
3.1.2.5 Datos de entrada	23
3.1.2.6 Mallado	23
3.1.3 Proceso	24
3.1.3.1 Estudio	24
3.1.4 Postproceso	24
3.1.4.1 Resultados.....	24

3.1.4.2 Gráfica	26
3.2 Enfriamiento	27
3.2.1 Características del ventilador	27
3.2.2 Preproceso	27
3.2.2.1 Geometría	28
3.2.2.2 Materiales	28
3.2.2.3 Física	29
3.2.2.4 Ecuaciones	29
3.2.2.5 Datos de entrada	30
3.2.2.6 Mallado	30
3.2.3 Proceso	31
3.2.3.1 Estudio	31
3.2.4 Postproceso	31
3.2.4.1 Resultados	32
Conclusión	34
Bibliografía	35

Capítulo 1: Marco de referencia

1.1 Introducción

Con la finalidad de continuar con las propuestas de desarrollo de ingeniería en máquinas de rotomoldeo se propone diseñar y fabricar una maquina cuyo objetivo sea fabricar productos rotomoldeados de diferentes pesos y dimensiones no más grandes que las descritas en el objetivo general del proyecto. Dicha máquina tendrá movimiento biaxial, sistema de fácil sujeción del molde, sistema controlado de calentamiento por resistencias eléctricas y un sistema de enfriamiento, será automática, de fácil montaje y desmontaje, adicionalmente utilizará: sistema de dosificación de polietileno, sistema de movilización de moldes, sistema de supervisión, control y adquisición de datos.

La finalidad de este proyecto es construir una máquina de rotomoldeo basada en calentamiento eléctrico por resistencias y que de forma general podría tener los módulos y dimensiones ilustrados en la Figura 1.

Esta máquina deberá tener un bastidor para soportar moldes con medidas máximas entre 0.7 y un metro de su longitud mayor. El molde deberá poder ser conectado y desconectado de forma rápida a la máquina para ser sustituido por el molde de la pieza a producir.

La potencia eléctrica y neumática será transferida desde la estructura principal a hacia el molde a través del uso de anillos de deslizamiento (slip rings) mientras que las señales eléctricas serán transmitidas por telemetría e incorporadas a la red de entradas salidas del controlador del sistema.

La obtención de la energía para alimentar las resistencias eléctricas se utilizarán módulos de celdas fotovoltaicas donde estos módulos aprovechan la energía solar para transformarlas en energía eléctrica y así cuidando el medio ambiente.

Analizar antes un sistema mediante el método de elemento finito ha facilitado muchos procesos en la industria, se han reducido los costos en pruebas y esto ha dado más oportunidad a muchas personas para realizar dicho análisis. El método de análisis por elemento finito usando Comsol Multiphysics para la simulación del enfriamiento de un molde usando ventiladores con cierta velocidad de salida del aire y cierta temperatura podemos ver tanto el perfil de temperatura como la velocidad del fluido y sus direcciones.

Tanto el calentamiento como el enfriamiento del proceso del rotomoldeo son muy importantes porque estos factores definen el tiempo de casi todo el proceso. Para el calentamiento del proceso se eligieron resistencias eléctricas de mayor eficacia que existe en el mercado y colocadas en lugares muy específicos del molde a calentar y para el enfriamiento se utilizarán ventiladores de muy alta eficiencia que existe en el mercado y se colocaron en lugares muy específicos.

Se desea que el sistema sea compacto y pueda ser manipulado de tal forma que para su puesta en marcha solo sea requerido anclarla al piso y conectarla al sistema eléctrico (toma 220V, 3F, 3H). Por este motivo la máquina deberá tener embebidos todos los sistemas secundarios que requiera, como es el caso de la presión del aire.

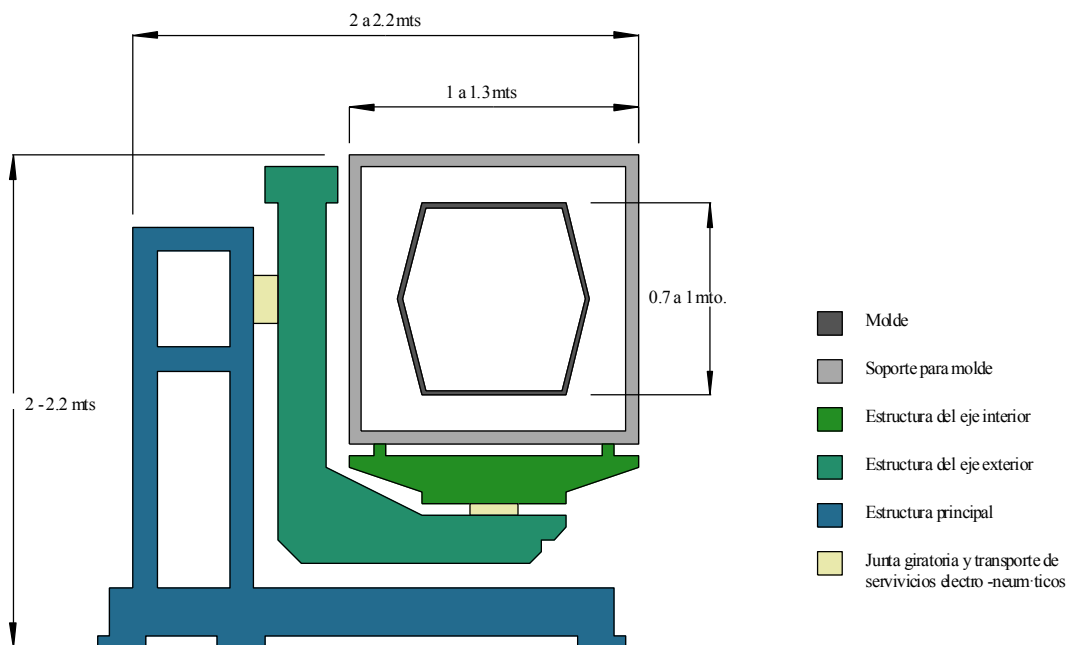


Figura 1.1: Concepto general de la máquina

1.2 Objetivo general

Diseñar y construir una máquina automática compacta de rotomoldeo ecológica de fácil montaje, que permita la fabricación de piezas de polietileno de distintas formas con tamaño menor de 0.90 m de largo, 0.90 m de ancho y 1.00 m de alto, a través de un sistema de calentamiento por resistencias aprovechando la energía solar y un sistema de enfriamiento forzado, mejorando los tiempos de los ciclos de producción y aprovechando su análisis de calentamiento y enfriamiento con el método de elemento finito usando el software Comsol Multiphysics.

1.3 Objetivos específicos

1. Hacer el diseño conceptual de la maquina así como definir los componentes sistemas y demás equipos que sean necesarios para su funcionamiento.
2. Diseñar a detalle la estructura mecánica contemplando el espacio y montaje de los anillos deslizadores para transmitir potencia eléctrica y neumática, así como la ubicación y montaje de sensores, anclajes, válvulas, tableros y demás elementos que componen el sistema.
3. Seleccionar los elementos de control necesarios y hacer pruebas de compatibilidad y funcionamiento.
4. Diseñar y construir los tableros y equipos de control.
5. Puesta en marcha del sistema automático.

1.4 Características técnicas esperadas

Largo total:	2 - 2.5	m
Ancho total:	2 - 2.5	m
Altura total en reposo:	2 – 2.2	m
Altura total en movimiento:	2.3 – 2.8	m
Peso aproximado:	Aún no definido.	
Tipo de máquina:	Sin clasificación	
Medio de calentamiento:	Resistencias eléctricas	
Rango de Temperatura:	180 – 200	°C
Alimentación eléctrica:	220	Vca, 3F, 3H.
Potencia eléctrica:	14	KW
Densidad de potencia eléctrica:	2.785	KW/m ² .
No. Máximo de zonas de control de temperatura:	8	Zonas

Espacio para moldes:

- Largo: 0.90 m
- Ancho: 0.90 m
- Alto: 1.00 m

Equipos auxiliares:

1. Sistema de dosificado
2. Sistema de movilización de moldes
3. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos

Características del molde:

- Material: Acero inoxidable acero ASTM A240 430/2B calibre 14.
- Volumen: 0.45 m³
- Peso: 80 Kg

1.5 Funcionamiento del sistema

La máquina a diseñar y fabricar cuenta con un sistema de calentamiento mediante resistencias eléctricas que rodean al molde. En específico se tendrá 8 zonas de calentamiento, las cuales son controladas como sistema de lazo cerrado a través de un termopar por zona. Se aplican controles PID para garantizar la uniformidad de temperatura en todo el molde.

El sistema de enfriamiento se ubica en la estructura del eje principal y se realiza mediante 4 ventiladores ubicados estratégicamente para garantizar un enfriamiento rápido.

Debido al giro biaxial es necesario transmitir la potencia eléctrica y neumática hacia el molde por medio de anillos deslizantes (slip rings) acoplándolos al eje de cada transmisión mecánica. El movimiento de ambos ejes estará controlado por variadores de frecuencia para manipular la velocidad de giro del molde.

Las señales de control de los elementos que están girando tanto en el eje principal como el secundario se transmiten vía telemetría hacia el PLC como entradas y salidas remotas. Así mismo el PLC está comunicado a un panel de mando en donde se encuentra una pantalla táctil en la cual el usuario interactúa con la máquina a través de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos.

La planta estará suministrada eléctricamente con una planta de energía alternativa con la potencia necesaria para hacer funcionar la máquina y de esta manera contribuir al cuidado de la energía y del ambiente.

1.6 Caracterización del área en que participó

1.6.1 Rotoinnovación S. A. de C. V.

Se dedica a la Innovación, es diversa y con una herencia orgullosa, confiada, apasionada a proporcionar una calidad superior y constante y comprometida para asegurar discreción y confidencialidad total, y que nuestra actividad y la de nuestros clientes sean competitivas internacionalmente.

1.6.2 Misión

Ofrecer las mayores ventajas en el diseño y maquila de productos, con el respaldo de la tecnología más avanzada, las mejores soluciones, y el cumplimiento total con el cliente superando sus expectativas con oportunidad y eficiencia, así como ganar su confianza por nuestra calidad, consistencia y una atención personalizada.

1.6.3 Visión

Ser la mejor opción para nuestros clientes en la investigación y desarrollo de productos rotomoldeados, caracterizarnos por nuestra calidad, por utilizar tecnología ecológica para cuidar el medio ambiente y distinguirnos por nuestra innovación permanente.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Sistema de rotomoldeo

2.1.1 El rotomoldeo

Las primeras formas de trabajar con el rotomoldeo se cree que comenzaron en el Antiguo Egipto cuando utilizaban un proceso rotacional para crear cuerpos ahuecados de cerámica. En tiempos más recientes en Estados Unidos entre 1940 y 1950 el proceso de moldeo rotacional ha sido desarrollado para un número pequeño de plástico, pero su popularidad no llegó muy lejos porque era considerada como un proceso lento. En las últimas décadas, sin embargo, las mejoras de control de procesos y la evolución de polvo de plástico han dado lugar a un gran aumento en su uso.

Según el artículo Mansfield Noel Ward, "Una historia de moldeo rotacional", la solicitud original de moldeo rotacional, estaba en la creación de cabezas de muñecas durante la década de 1940. El molde fue creado a partir de electro-níquel-cobre y el polímero utilizado fue de PVC (cloruro de polivinilo) plastisol. Este nuevo proceso se impuso en la industria y la sustituyó rápidamente a la de papel maché método de la época. Pronto muchos otros juguetes para los niños estaban siendo fabricados por este proceso, tales como juguetes y pelotas.

En la década de 1950, cuando el proceso se entiende mejor las solicitudes de otras industrias se han desarrollado como conos de carretera, boyas marinas, y el reposa brazos del automóvil. El proceso de Engel se desarrolló en Europa en la década de 1960 que permitió a los recipientes grandes huecos que se crean en polietileno de baja densidad (LDPE) girando (o meciéndose) un molde sobre un chasis con chorros de gas abierto, a través de 30 grados, que cubría el interior del molde con el polímero. El método de enfriamiento fue simplemente apagar los quemadores. Esto permitió que la temperatura descendiera lentamente hasta que pudiera ser extraído del molde.

Formado en Chicago en 1976, la "Association of Rotational Molders" (ARM) es una asociación comercial mundial que representa actualmente a las empresas en 58 países. El objetivo de la asociación es promover el moldeo rotacional, participar activamente en la investigación y el desarrollo. ARM es en gran medida responsable del desarrollo y la sensibilización de mercado del proceso.

En la década de 1980 el proceso de moldeo rotacional se simplificó por los proveedores más grandes de material de todo el mundo. Y en respuesta a la creciente demanda, los nuevos materiales y los grados estuvieron disponibles. Los tanques de almacenamiento de todos los tamaños y formas tradicionalmente han dominado la industria en varias composiciones incluidas policarbonatos, poliéster, polipropileno, polietileno de baja densidad, nylon y ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) que se complementa LDPE y polietileno de alta densidad (HDPE). Y en 1984, el rotomoldeo se convirtió en el proceso de elección para la fabricación de estanques de aguas y químicos, juegos infantiles, kayaks de mar y canoas. Los estudios en la Queen's University, Belfast, llevó a la comprensión científica ha mejorado mucho el proceso de rotomoldeo, incluido el desarrollo de un sistema de medición continua de temperatura del molde llamado "Rotolog" del sistema [1].

De aquí en adelante este proceso ofrece gran libertad de diseño, pues es posible fabricar artículos sorpresivamente complejos con herramientas relativamente sencillas y de bajo costo que en ciertos casos sería imposible moldear con otro procedimiento.

En la fabricación de ciertas piezas huecas, con geometría de curvas complejas, pared uniforme, y "contrasalidas", el Rotomoldeo es una alternativa con menor costo frente al moldeo por Soplado. Sin mencionar que debido a las bajas presiones empleadas en el Moldeo Rotacional se producen piezas con tensiones internas mínimas, presentando un buen comportamiento mecánico debido a su mayor solidez en comparación con las piezas producidas a través del Soplado o la Inyección.

Los niveles productivos del Rotomoldeo pueden variar de algunas cuantas piezas, a cientos o miles de artículos, también es adecuado para la producción en baja escala con vista a la obtención de prototipos. Además, a causa de la libertad de diseño, este proceso sobresale entre las técnicas de alta velocidad y productividad. Además, el bajo costo de este proceso permite la experimentación con diversos materiales, distribución en el calibre de pared o con el acabado de las piezas.

El Moldeo Rotacional transforma materiales termoplásticos, dentro de los cuales los más comunes son: Polietileno de Alta Densidad, Polivinilo Clorado en su presentación como Plastisol y Poliamida. Mientras el Plastisol tiene una consistencia líquida, el PEAD y la Poliamida se alimentan como polvos. De otra forma no podrían ser fundidos ni moldeados ya que el calor para realizar esto se transmite al material por conducción, proceso

optimizado al aumentar el área de contacto en un polvo; considerando además, que en este estado el plástico puede “fluir” para tocar todas las paredes del molde mientras vaya girando.

Los espesores de pared de los artículos rotomoldeados por lo general permanecen constantes, donde el espesor puede ir de 1 mm hasta el grosor que se requiera de acuerdo a las funciones de la pieza. Las paredes delgadas y paralelas presentan excelentes propiedades de resistencia a la carga.

Este proceso ofrece gran flexibilidad en cuanto al tamaño del producto, siendo factible moldear desde pequeños bulbos, para lavado auditivo, hasta tanques de almacenamiento de más de 15 000 litros; sin embargo, la mejor productividad se obtiene con moldes medianos y grandes. Las roscas, orificios e insertos metálicos se pueden incorporar a la pieza dentro del mismo proceso (dependiendo del diseño), eliminando costos por operaciones secundarias necesarias en otros procesos de transformación.

Por último, existen bajos niveles de desperdicio ya que este proceso no requiere el uso de coladas, ni bebederos. El material excedente o no deseado es poco en comparación con otros procesos para fabricar piezas huecas [7].

2.1.2 Ventajas

- Bajo costo de utillaje.
- Increíblemente versátil para obtener piezas huecas
- Gran variedad de colores y acabados.
- Los materiales utilizados son resistentes a la intemperie y otras

Propiedades pueden ser especificadas con el uso de aditivos.

- Gran resistencia a la corrosión y a la rotura por fatiga.
- Materiales reciclables.
- Posibilidad de realizar exteriores e interiores
- Posibilidad de realizar insertos metálicos

2.1.3 Aplicaciones

- Transporte aéreo, marítimo y terrestre: camiones, furgonetas, vehículos todo terreno, motos, autobuses, vehículos especiales.
- Equipos de limpieza
- Juguetes y juegos de Jardín
- Deportes
- Recreo
- Mobiliario urbano
- Maquinaria agrícola
- Maquinaria de construcción y equipo pesado
- Máquina herramienta
- Aplicaciones especiales

2.1.4 El proceso de rotomoldeo

El rotomoldeo es un proceso simple de cuatro etapas en el cual se usa un molde cerrado de paredes delgadas y alta capacidad de transferencia de calor. Requiere una entrada para la alimentación de la materia prima a ser transformada, y debe ofrecer la posibilidad de ser abierto para que se puedan retirar las partes plastificadas.

En general se coloca una cantidad conocida de plástico en polvo y seco que rota simultáneamente en dos ejes perpendiculares; con la rotación lenta del molde, el material se funde adhiriéndose a las paredes calientes y cubre toda la superficie homogéneamente. Este principio de operación hace que el material pueda adquirir una diversidad importante de configuraciones para formar piezas de diferentes tamaños, y que quede distribuido en toda la superficie con un espesor uniforme.

2.1.5 Llenado del molde

En el molde se introduce la cantidad necesaria de material plástico a procesar, que generalmente es un termoplástico en polvo finamente molido; sin embargo, también se pueden procesar dispersiones de termoplásticos en solventes no volátiles y algunas resinas termoestables. La cantidad de material introducida es el peso deseado de la pieza final. El material es montado en un molde abierto y frío cubierto previamente en su interior con agente desmoldante. Luego el molde es cerrado y llevado al interior de un horno para ser calentado.

2.1.6 Calentamiento del Molde

Una vez preparado el molde, se somete a la aplicación de calor y simultáneamente se hace rotar sobre dos ejes perpendiculares a fin de permitir que el material se vaya adhiriendo poco a poco a la pared interna y se fusione en una masa continua. La fusión es un proceso que un material sólido, y no implica que el material pase al estado líquido (fundición) y luego se resolidifique; por lo tanto las partículas en el proceso de rotomoldeo no se funden realmente, sino que se sinterizan en los puntos de contacto, hasta formar una red tridimensional porosa. Finalmente, por capilaridad el material viscoso llena los poros remanentes.

El ciclo de calentamiento es la etapa de mayor duración en el proceso de rotomoldeo. El proceso de calentamiento de la resina y fusión de las partículas toma normalmente entre 7 y 15 minutos, aunque se conocen ciclos hasta de 30 minutos. La duración de esta etapa está directamente relacionada con el espesor deseado de la pieza final, pues a medida que el plástico se deposita sobre las paredes del molde, debido a su pobre capacidad de conductividad térmica, actúa como un aislante que disminuye la transferencia de calor hacia el material que todavía no se ha incorporado a las paredes.

2.1.7 Enfriamiento del molde

Cuando todo el material plástico ha tomado la forma interna del molde, se procede a enfriarlo para que se endurezca y quede terminado con las características buscadas; durante esta etapa continúa la rotación, para garantizar uniformidad en la conformación de la pieza. Como medio de enfriamiento es posible usar agua fría dispersada en gotas sobre la superficie del molde (para lograr un enfriamiento rápido), una corriente de aire con vapor de agua condensado (con menor rapidez de enfriamiento) o aire frío (consiguiendo un enfriamiento lento).

2.1.8 Vaciado del molde

Al estar la pieza terminada, se procede a sacarla del molde y se puede iniciar un nuevo ciclo de producción. Esta última etapa, aparentemente muy sencilla, puede llegar a requerir métodos de alta tecnología cuando las piezas fabricadas tienen diseños intrincados o son de gran tamaño. La figura 2.1 nos muestra un proceso general de rotomoldeo.

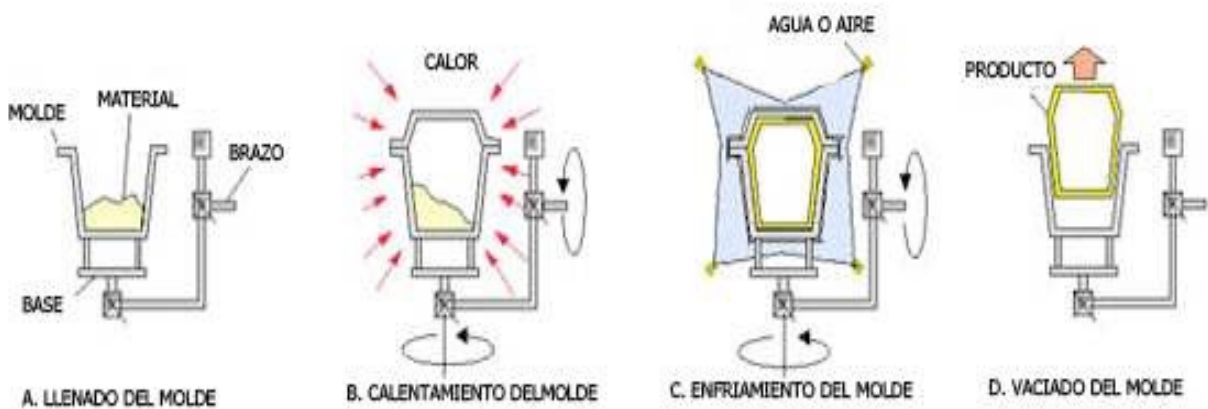


Figura 2.1: Esquema del proceso de Rotomoldeo [2].

2.1.9 Técnicas de procesos de Rotomoldeo

Una de las técnicas más usadas recientemente en la industria de los plásticos es el espumado. Las espumas son usadas sobre todo para aumentar la rigidez y proporcionar aislamiento térmico a las piezas. En la cuestión de la rigidez es importante que se sepa que este refuerzo es definitivo. Por otro lado, la solución basada en la adición de espumas de poliuretano que se está utilizando, pierde su eficacia con el tiempo debido a la falta de adherencia entre los materiales. Con esta técnica se pueden realizar placas de mayor resistencia y por lo tanto una mayor envergadura en los diseños. Otra ventaja de la utilización de las espumas de polietileno en el rotomoldeo es la reciclabilidad de la pieza entera. Este factor tiende a ganar importancia en los próximos años, periodo en que los fabricantes pueden ser obligados a recoger sus productos tras su vida útil. Además de las espumas, aplicaciones que utilizan múltiples capas sólidas se han tornado comunes, visando la obtención del mejor que cada material tiene a ofrecer. Para mantener su ritmo de crecimiento, la industria del rotomoldeo deberá continuar con inversiones progresivas. Los principales avances que deben ser buscados son la ampliación de los límites de la temperatura de trabajo continuo, aumento de la resistencia a la abrasión y de la resistencia química y rigidez. A la vez, también debe ser realizada la búsqueda flexibilidad y resistencia en otras situaciones. No podemos olvidarnos de que la evolución en el campo de los materiales debe ser acompañada del perfeccionamiento de los equipamientos y de las habilidades de los proyectistas, que comprenden y sacan el máximo provecho de las potencialidades. Existen casos en que una característica específica sólo puede ser obtenida con el uso de temperaturas de horno en aproximadamente 400 °C grados o rotaciones alrededor de 15 rpm. En el caso específico de las rotaciones más altas que lo normal, los proyectistas deben estar también atentos para las implicaciones en la distribución del material, y considerar que las antiguas reglas de proyecto ya no les serán suficientes. El aumento de la competencia es el argumento más importante en defensa de la necesidad de constante innovación en la amplia mayoría de los mercados, lo que incluye el rotomoldeo. Empresas pioneras exitosas atraen la atención de otros emprendedores que, a su vez, tienen interés en obtener su parte de ese mercado atractivo. Así, la única manera de perennizar el éxito es invertir constantemente en la renovación de los pilares de sustentación de su ventaja competitiva. En la figura 2.2 y 2.3 se pueden observar el polietileno espumado utilizado en la industria del rotomoldeo [8].



Figura 2.2: polietileno espumado [3].



Figura 2.3: fondo de un casco con proceso de espumado [4].

2.1.10 Tipos de máquinas

Los tipos de máquinas los podemos clasificar en dos grupos principalmente, en hornos y de flama abierta, el primero se subdivide en cuatro grupos los cuales se diferencian según el tipo de movimiento del molde y por su secuencia de producción. Y el segundo en dos grupos según su proceso de producción [9].

2.1.10.1 Hornos

Es este quizás uno de los equipos más fáciles de controlar y automatizar, mediante sensores de temperatura y PLC's, una de las principales ventajas es la eficiencia calórica ya que tienen una menor pérdida de energía calórica en el proceso. Pueden tener diferentes formas geométricas, pero las más utilizadas son los cilindros, ya que su forma hace que el calor pueda circular en forma uniforme en su interior, estos pueden ser de lámina negra, inoxidable y otro material resistente a la temperatura, pueden ser forrados en lana mineral u otro aislante térmico para altas temperaturas, para conservar de manera más eficiente el calor en su interior. Las fuentes de calor más utilizadas son el gas natural o propano, que mediante el sistema de convección aumentan su eficiencia calórica. También existen otras fuentes menos convencionales como la eléctrica la cual aporta calor al molde mediante radiación.

2.1.10.2 Flama abierta

Este sistema de rotomoldeo es uno de los bajos de inversión inicial, se usa comúnmente para la fabricación de estanques hasta de 10.000 litros de capacidad, posee además un bajo consumo eléctrico debido a que su sistema de motorización es directo y simple. Se pueden fabricar piezas monocapas, multicapas y espumados. En la figura 2.4 se ve claramente una máquina de rotomoldeo de flama abierta [10].



Figura 2.4: sistema de flama abierta [5]

2.1.11 Matrices para rotomoldeo

2.1.11.1 Tipos de matrices

Las matrices o moldes para la fabricación de piezas de rotomoldeo es una de las piezas claves de un proyecto y es aquí donde el papel de la ingeniería juega un rol importante, ya que en la etapa de diseño del molde se reflejará directamente en el producto la cantidad de ingeniería aplicada en él. Dependiendo de la inversión del proyecto, el nivel de productividad, calidad de la terminación del producto y el sistema de enfriamiento a utilizar dependerá la elección del material con el cual se fabricará el molde.

2.1.11.1.1 Acero Inoxidable

Este tipo de material para moldes es ideal para producciones medianas que no requieren complejidad de formas. Sus principales ventajas son, el molde puede ser enfriado por agua, buena calidad de acabado superficial, durabilidad del molde entre 3 a 5 veces uno de lámina negra. Sus principales desventajas son: costo del material y la mano de obra especializada [6].



Figura 2.5: molde de acero inoxidable [6].

Capítulo 3: Resultados

Los resultados obtenidos sobre el calentamiento y el enfriamiento fueron por el método de elemento finito usando Comsol Multiphysics. El uso del método de elemento finito son muy precisos comparados a la realidad. El software utiliza las ecuaciones adecuadas para obtener un resultado.

Los resultados sobre el calentamiento y el enfriamiento del molde del molde son los siguientes:

3.1 Calentamiento

Para el calentamiento del molde de 450 litros se utilizaran unos calentadores de caucho de silicona la cual son: rudas, flexibles y ligeros. Las resistencias de caucho de silicona llegan a alcanzar 260 °C, aumentan la transferencia de calor y por lo tanto aumenta la velocidad del calentamiento del molde, el cual es conveniente para el molde porque se quiere calentar a una temperatura de 200 °C lo cual será controlada por un sensor de temperatura.

3.1.2 Preproceso

En esta etapa se agregan algunas condiciones fundamentales para efectuar la simulación, tales como la física, el tipo de estudio y la dimensión en la que se espera trabajar con la geometría.

3.1.2.1 Geometría

La geometría del molde se dibujó en 2D en un plano X,Y, cuyas medidas como se muestra en la figura 3.1 están en metros (m).

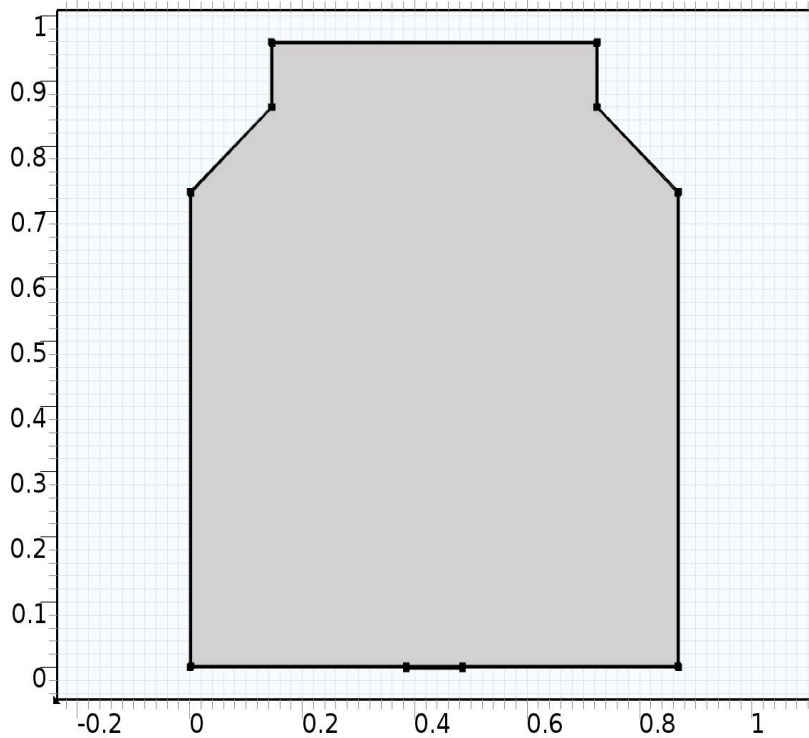


Figura 3.1: molde de 450 lt en 2D

3.1.2.2 Materiales

El tipo de material del molde es de acero ASTM A240 calibre 14, y adentro del molde se encuentra aire que al principio está a temperatura ambiente. El molde esta de color azul como se muestra en la figura 3.2 y el aire se muestra en la figura 3.3.

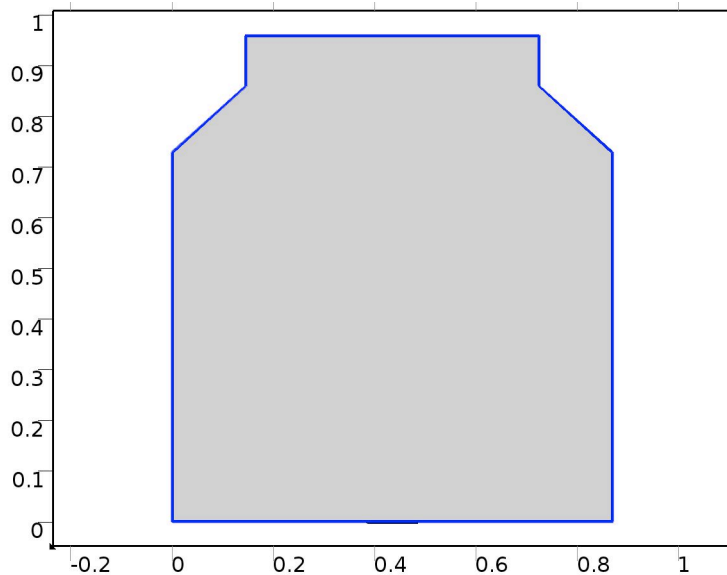


Figura 3.2: grosor del molde (color azul)

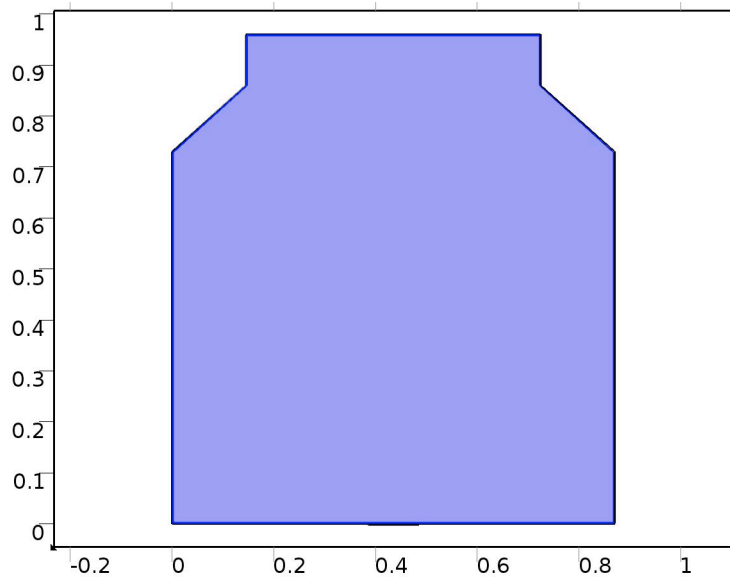


Figura 3.3: representación del aire (color azul)

3.1.2.3 Física

En Comsol Multiphysics se pueden mezclar físicas lo cual es muy importante y podemos ver el comportamiento de dichas mezclas de físicas. En este análisis se utilizó la física de calentamiento por el efecto joule que está conformado por: corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos y una multifísica que se encarga de mezclar las dos físicas mencionadas anteriormente.

3.1.2.4 Ecuaciones

3.1.2.4.1 Ecuaciones de corriente eléctrica:

$$\nabla \cdot J = Q_j \text{-----ec. 3.1}$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \text{-----ec. 3.2}$$

$$E = -\nabla V \text{-----ec. 3.3}$$

3.1.2.4.2 Ecuaciones de transferencia de calor:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \text{-----ec. 3.4}$$

3.1.2.5 Datos de entrada:

Según los cálculos que se realizaron donde se tomaron en cuenta el calentamiento del molde de 450 litros y el calentamiento del polímero se consumirá aproximadamente 14 - 15 KW a una temperatura ambiente de 25 °C, basta saber estos datos para analizar el proceso.

3.1.2.6 Mallado

El mallado que se utilizó en este proceso es controlada por la física que viene definido en el software y el tamaño de la malla fue normal que también viene definido por el software. Se ve muy claro la distribución de la malla según las necesidades de nuestro análisis y se puede ver en la figura 3.4.

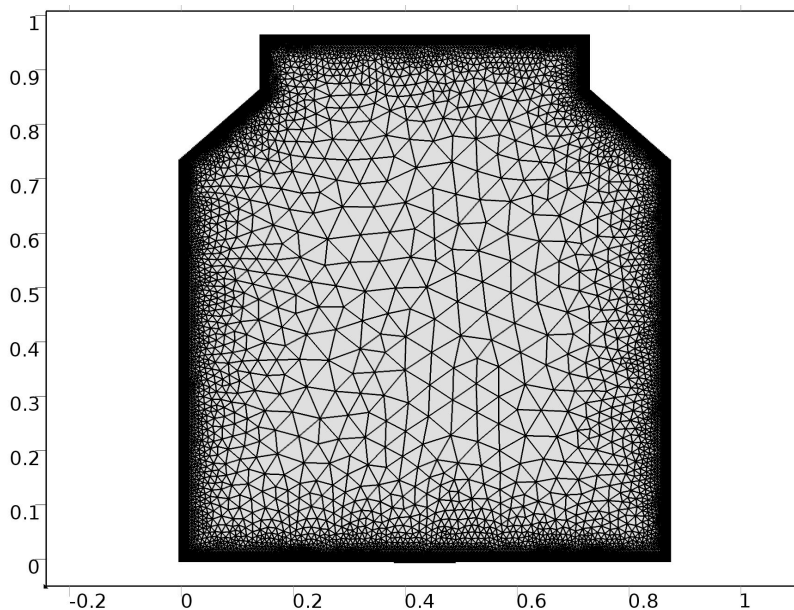


Figura 3.4: proceso de mallado

3.1.3 Proceso

En esta etapa se anexan las especificaciones que lleva el modelo para realizar el análisis.

3.1.3.1 Estudio

El tipo de estudio que se utilizó para este proceso es temporal, esto quiere decir que cambia respecto al tiempo y se puede poner el tiempo de acuerdo a nuestro estudio y en este caso el tiempo que se puso fue de 1 – 120 segundos, con intervalos de 1 segundo.

3.1.4 Postproceso

En esta etapa final se presentan los resultados, inicialmente con las características predefinidas por el programa.

3.1.4.1 Resultados

En esta etapa se obtuvieron dos resultados que son: superficie de temperatura y el contorno isotérmicos.

En la figura 3.5 se observa el comportamiento de la temperatura a los 120 segundos según la condición que se puso anteriormente dando un resultado que es favorable para dicho análisis.

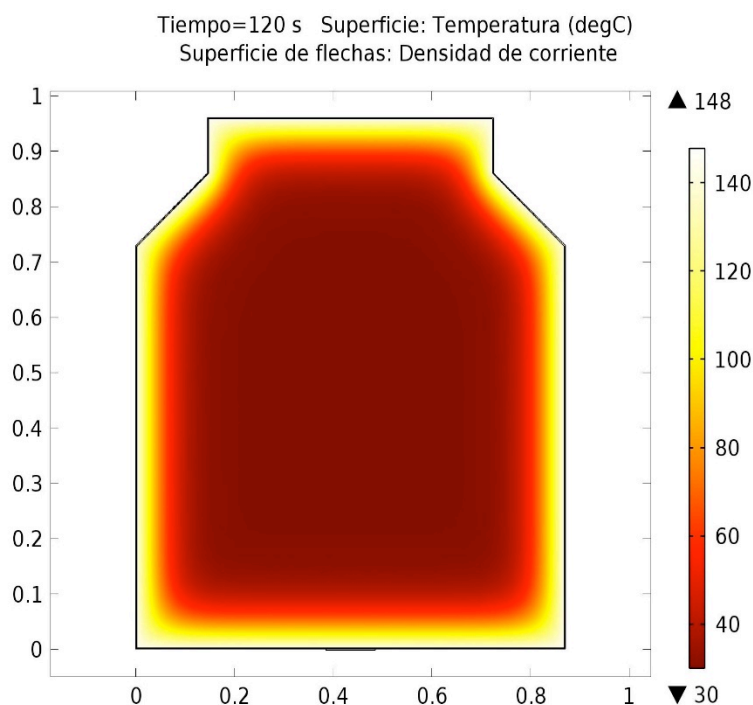


Figura 3.5: superficie de temperatura.

Los contornos isotérmicos se ven en la figura 3.6. Que son los cambios de temperatura que hay en el molde y se nota claramente cada capa de temperatura en cada milímetro en el molde.

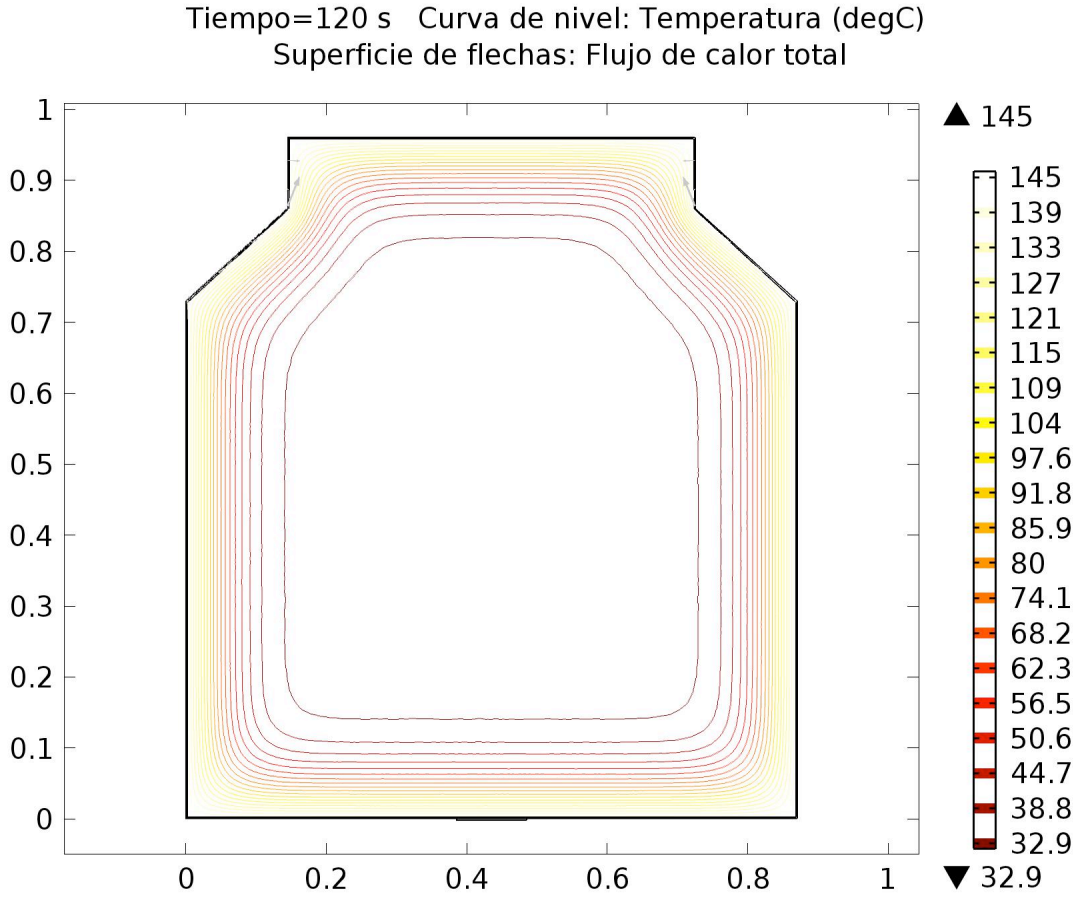


Figura 3.6: contornos isotérmicos.

3.1.4.2 Gráfica

La gráfica lineal de temperatura comprende de 119-120 segundos y es alrededor del molde y se ve en la figura 3.7.

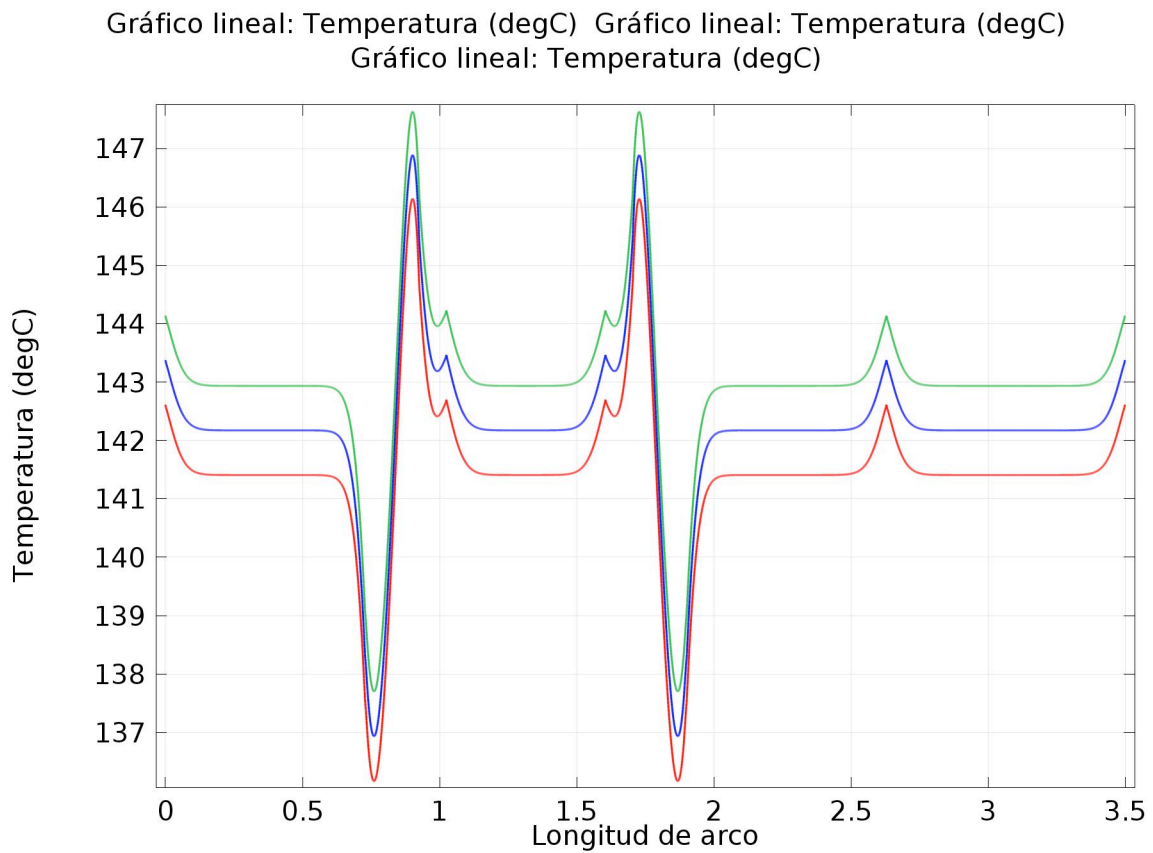


Figura 3.7: gráfica de temperatura

3.2 Enfriamiento

3.2.1 Características del ventilador

Para la simulación del enfriamiento del molde indicado anteriormente se utilizaron 4 ventiladores axiales direccionadores de aire de 400 mm de diámetro con una velocidad de hasta 3 m/s hasta el molde que está ubicado a 40 cm de ella como se ve en la figura 3.8.

3.2.2 Preproceso

En esta etapa se agregan algunas condiciones fundamentales para efectuar la simulación, tales como los conocimientos de física, el tipo de estudio y la dimensión en la que se espera trabajar con la geometría.

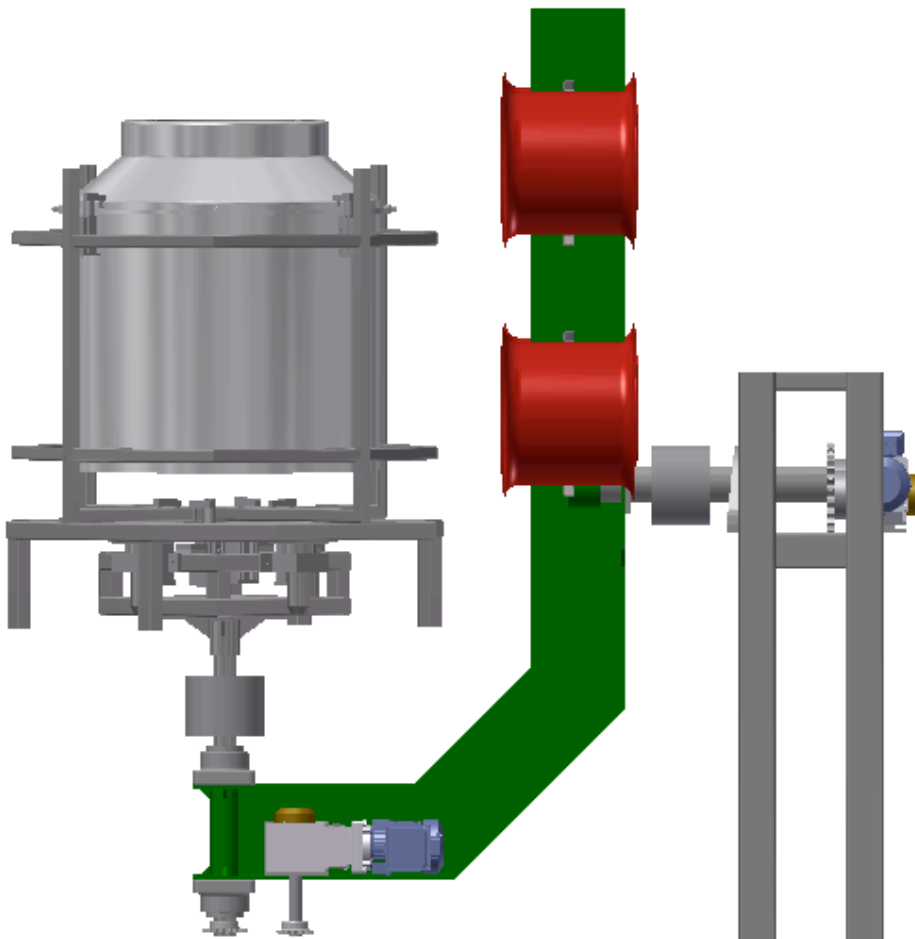


Figura 3.8: Posición de ventiladores

3.2.2.1 Geometría

Se analiza en 2D debido a que la geometría es simétrica como se ve en la figura 3.9.

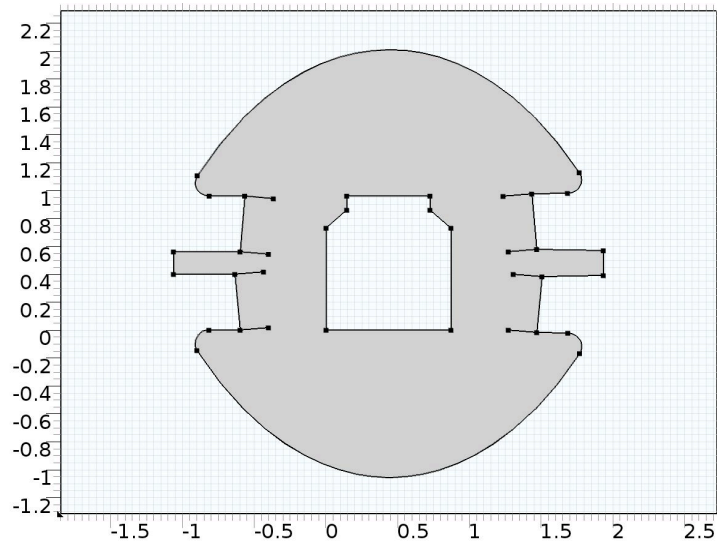


Figura 3.9: posición de ventiladores en 2D

3.2.2.2 Materiales

Los materiales que se utilizaron durante el proceso de simulación es el medio ambiente que se consideró el aire y un molde de acero con características mencionadas anteriormente como se ve en la figura 3.10.

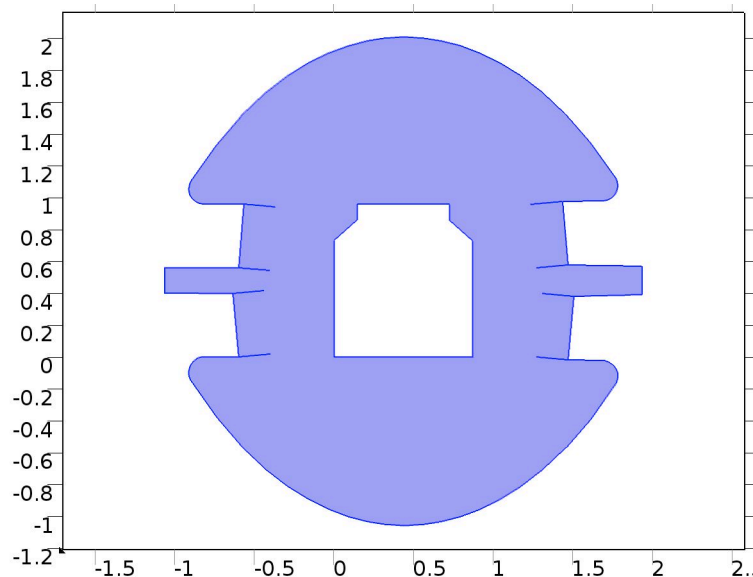


Figura 3.10: medio ambiente

3.2.2.3 Física

Usando Comsol Multiphysics que utiliza el análisis con el método de elemento finito, podemos demostrar cómo se comporta la superficie de temperaturas, en base a la física de estudio que trae el software en este caso se utilizó transferencia de calor conjugado el cual está conformado por dos físicas que son: transferencia de calor en sólidos y flujo de fluidos turbulento y una multifísica que hace que se combinen las dos físicas mencionadas anteriormente.

El mecanismo de transferencia de calor que se utilizó durante la simulación es transferencia de calor por convección forzada.

3.2.2.4 Ecuaciones

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pl + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I - \frac{2}{3}\rho kl \right] + F \text{ -----ec. 3.5}$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \text{ -----ec. 3.6}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + Pk - \rho \varepsilon \text{ -----ec. 3.7}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \varepsilon = ep \text{ -----ec. 3.8}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \text{ -----ec. 3.9}$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot u \text{ -----ec. 3.10}$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \text{ -----ec. 3.11}$$

3.2.2.5 Datos de entrada

Se puso una velocidad de 4 m/s con una temperatura del medio ambiente de 15 °C y el molde con una temperatura inicial de 200 °C y se ve en la figura 3.11.

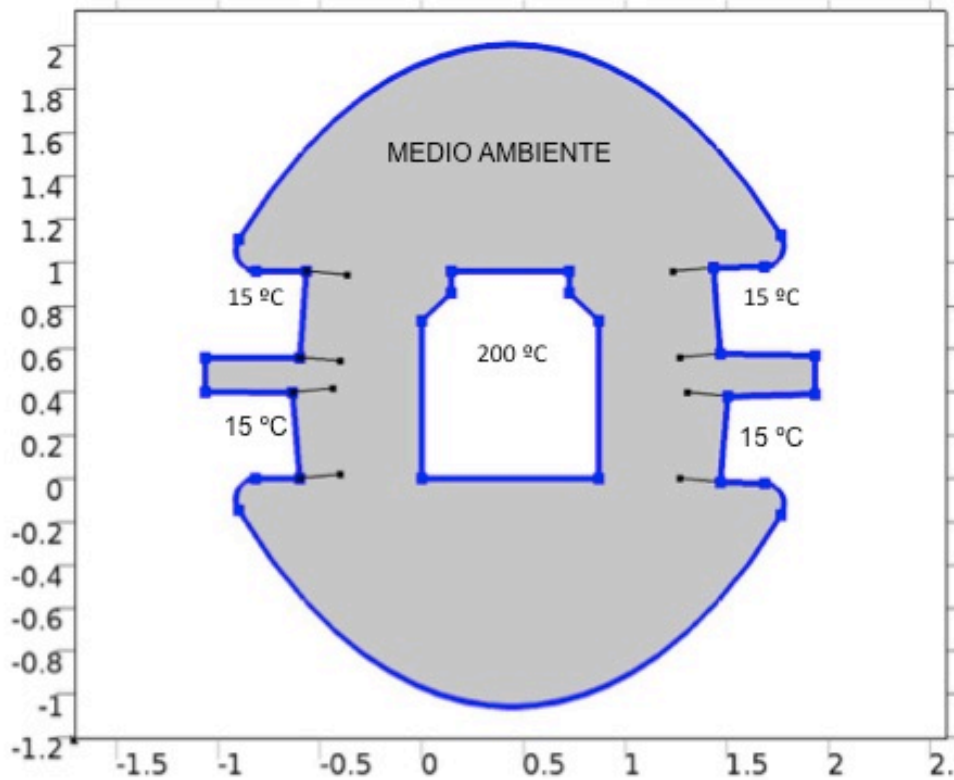


Figura 3.11: representación general del análisis

3.2.2.6 Mallado

Para el análisis del método de elemento finito uno de los principales puntos es el mallado.

El tipo de malla que se utilizó es extremadamente gruesa que ya viene definido por el software y se muestra en la figura 3.12.

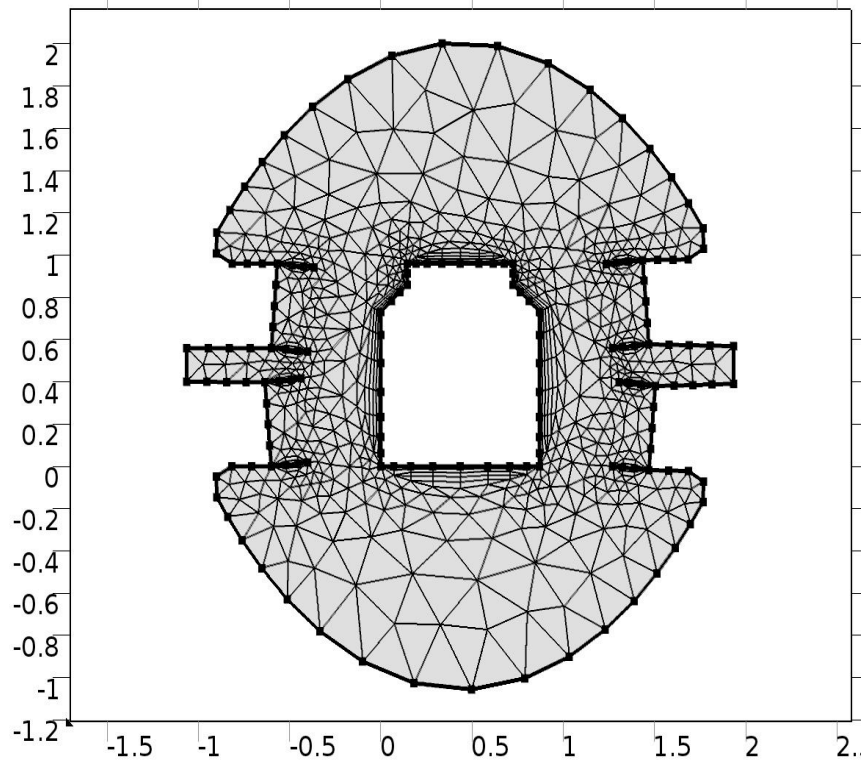


Figura 3.12: mallado del proceso

3.2.3 Proceso

En esta etapa se anexan las especificaciones que lleva el modelo para realizar el análisis.

3.2.3.1 Estudio

El tipo de estudio que se utilizó es estacionario porque el proceso no cambia respecto al tiempo y por lo tanto no se incluye la linealidad de la geometría durante el proceso.

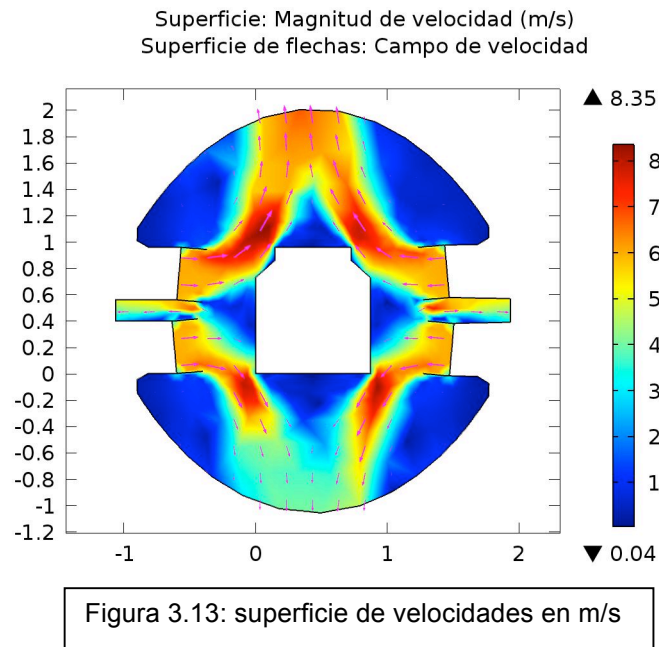
3.2.4 Postproceso

En esta etapa final se presentan los resultados, inicialmente con las características predefinidas por el programa.

3.2.4.1 Resultados

En esta etapa se obtuvieron dos resultados que son: superficie de velocidad, superficie de temperatura.

En la figura 3.13 se observa el comportamiento de los diferentes tipos de velocidades alrededor del molde los cuales se diferencian según su magnitud y se puede ver el cambio de velocidad de acuerdo a la barra de colores y las velocidades están expresadas en m/s.



En la figura 3.14 se observa una superficie de temperaturas y una superficie de flechas donde la superficie de temperaturas se puede observar en la barra de colores y la superficie de flechas muestra la dirección del flujo de fluidos.

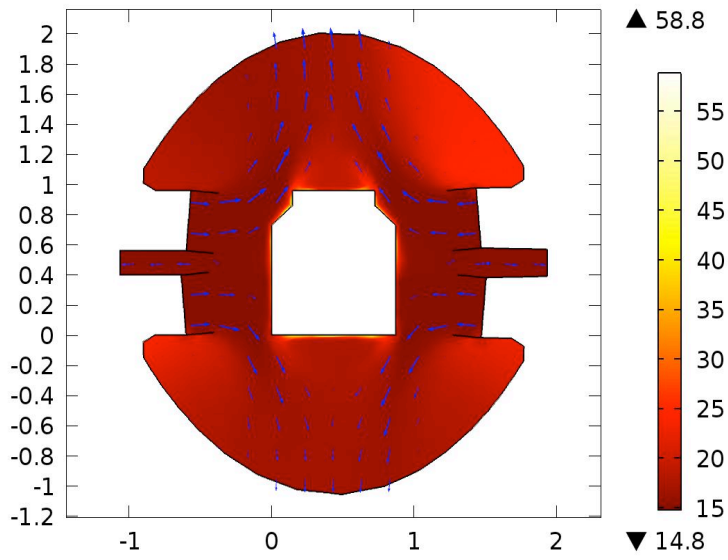


Figura 3.14: superficie de temperaturas en °C y superficie de flechas.

Conclusión

Durante el proceso de calentamiento se demuestra que es eficiente porque la selección de los calentadores son los adecuados y los más óptimos que existen en el mercado. Con el estudio y la simulación, se puede dar una idea muy clara de cómo se comporta el calor alrededor del molde durante un calentamiento de aproximadamente 3 minutos. Durante el análisis del proceso se analizó de 2 minutos porque el software es muy pesado y no se tiene el equipo sofisticado para realizar dicho análisis.

Para el enfriamiento se pudo demostrar claramente cómo se comporta el calor alrededor del molde calentado a 200 °C y se pueden ver las direcciones del flujo de calor alrededor del molde. Para la industria del rotomoldeo es importante tanto un buen calentamiento como un buen enfriamiento para acelerar el proceso de materiales plásticos. Gracias al software llamado Comsol Multiphysics se ahorra mucho tiempo para el estudio tanto del enfriamiento como el calentamiento mediante la simulación.

Estos resultados obtenidos durante el proceso de calentamiento y enfriamiento del molde son claras y favorables utilizando el software mencionado anteriormente, por lo tanto, se reducen los gastos y se evitan pérdidas porque ya no es necesario estar haciendo pruebas lo cual es muy costosa.

Bibliografía

- [1] Plastiquarian: The PHS Magazine N°19
- [2] http://www.seriesz.com/2009/06/15/rotomoldeo/rotational_moulding_process
- [3] <http://www.bergeninternational.com/html/TiposPro.htm#rotational>
- [4] <http://www.ahoy-boats.biz/TS515/index.html>
- [5] <http://www.reductioninternational.com/MaquinasFlamaAbierta.html>
- [6] <http://www.versaplas.com/es/moldes.html>
- [7] Design blog (junio 15, 2009). Rotational Moulding Process. Recuperado el 17 de noviembre de 2010. www.seriesz.com/2009/06/15/rotomoldeo/rotational_moulding_process
- [8] D&M Plastics (s.f). The History of Rotational Moulding. Recuperado el 10 febrero de 2011, de <http://www.rotationalmoulding.ca/history.htm>.
- [9] Rotoline (s.f). Máquinas para Rotomoldeo – Máquinas Shuttle. Recuperado el 15 de diciembre de 2010, de <http://www.rotoline.com.br>.
- [10] Reduction International (s.f). Máquinas de Flama Abierta. Recuperado el 01 de diciembre de 2010, de <http://www.reductioninternational.com/MaquinasFlamaAbierta.html>.