

**ANÁLISIS TÉRMICO DEL AISLAMIENTO DE UN
DISPOSITIVO DE EXTRUSIÓN DE ARIETE A BAJA
ESCALA, PARA EL RECICLAJE DE BOLSAS
PLÁSTICAS**

LUIS MARTÍN SUÁREZ ROJAS

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, JUNIO 23 DE 2021**

ANÁLISIS TÉRMICO DEL AISLAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE EXTRUSIÓN DE ARIETE A BAJA ESCALA, PARA EL RECICLAJE DE BOLSAS PLÁSTICAS

LUIS MARTÍN SUÁREZ ROJAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director:
BLADIMIR A. RAMÓN VALENCIA**

Doctor en Ingeniería de Materiales

**Email:
hbladimir@unipamplona.edu.co**

**Codirector:
JORGE ANTONIO VELASCO
PARRA**

Ingeniero mecánico

**Email:
antonio.velasco@unipamplona.edu.co**



**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, JUNIO 23 DE 2021**

DEDICATORIA

¡A mis muy queridos padres Ana Milena Rojas y Martín Suárez!

*Por su apoyo incondicional y acompañamiento
en este proceso formativo gracias por todos
y cada uno de esos momentos de felicidad y cariño*

¡A mi gran compañero y mentor de vida Miguel Rojas!

*Por los grandes momentos de trabajo
y de inigualables conversaciones de lo incomprensible.*

¡A mi abuelo Hernando Rojas! Q.E.P.D

*Por ese amor infinito y tanta comprensión,
nos dejaste un gran legado, siempre estarás presente.*

¡A mi abuela Blanca Díaz!

*Por ese gran amor de abuela,
el más puro y real que he recibido.*

¡A mis hermanos!

*Por siempre estar ahí y mostrarles
que las metas se pueden alcanzar.*

¡A Héctor Julio Rojas! Q.E.P.D

*Por siempre inculcarme el mundo académico, por sus
grandes lecciones de vida y chistes que siempre recordaré.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mis padres por este logro alcanzado, por tener esta gran oportunidad de vida que muy pocos pueden, pero aun así me siento afortunado de todo lo que me ofrecieron.

A mi alma mater, por permitirme hacer parte de esta gran familia, por todas y cada una de las vivencias que tuve, cada experiencia y cada momento de aprendizaje.

A mi Director, Bladimir Ramón, por su apoyo y tantas cosas que pude aprender durante todo el proceso académico y la elaboración de este proyecto.

A mi Codirector, Antonio Velasco, por el gran acompañamiento que tuve de su parte, por su paciencia y gran capacidad para enseñar, gracias por tantas cosas aprendidas y por su gran calidad como persona, mis más sinceros agradecimientos.

Al profesor, Elkin Flórez, por su colaboración en asesoramiento en este proceso y como docente, lo admiro mucho.

A los demás docentes de programa, Albert Suarez, William Mora, Edison Martínez, Luz Karime Hernández, José Manuel Ramírez, Brayan Conde, Juan Carlos Serrano, Richard Triviño, Elkin Mora, Simón Figueroa, por cada granito de arena en mi enseñanza y mi formación integral.

A mis compañeros de lucha, Yerson Rico, Steven Matacea, Oscar Contreras y Alejandro Erazo, por tantos momentos de alegría y sufrimiento que vivimos, siempre los recordaré por tantas anécdotas vividas juntos, por su gran apoyo y amistad.

A mis demás compañeros, docentes, auxiliares de laboratorio que me tendieron la mano, e hicieron posible mi formación y la elaboración de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 2: ESTADO ACTUAL	13
2.1. LOS POLÍMEROS	13
2.1.1. Clasificación de los polímeros	14
2.1.2. Polietileno de baja densidad LDPE.....	15
2.1.3. Procesos de manufactura de plásticos	16
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	19
2.2.1. Transferencia de calor por conducción	20
2.2.2. Transferencia de calor por convección	22
2.2.3. Ecuación de conducción de calor.....	24
2.2.4. Conducción de calor en estado estable	24
2.2.5. Conducción de calor en estado transitorio	26
2.3. METODOLOGIA DE ASHBY.....	28
2.3.1. Traducir requisitos de diseño	29
2.3.2. Selección usando materiales	30
2.3.4. Priorización usando objetivos	30
2.3.5. Documentación	30
2.3.6. Material final.....	30
2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	31
2.5. ANTECEDENTES	33
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS.....	35
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	35
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	35
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	36
4.1. DETERMINACIÓN DE MODELO ANALÍTICO PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR	36
4.1.1. Parámetros dimensionales y condiciones de frontera	36
4.1.2. Definición del modelo analítico a partir de la ecuación de calor.....	38
4.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES MEDIANTE EL SOFTWARE GRANTA EDUPACK.....	46

4.2.1. Gráfica de conductividad contra temperatura máxima de servicio.....	47
4.2.2. Gráfica de densidad contra precio.....	48
4.3. SIMULACIÓN PARAMETRIZADA PARA LA SELECCIÓN DEL MATERIAL AISLANTE	49
4.3.1. CAD de la configuración de los materiales	49
4.3.2. Mallado de la geometría.....	51
• Estudio sensibilidad del modelo	51
4.4. SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO PARA LA FUNDICIÓN DEL LDPE	52
4.4.1. CAD de la configuración de los materiales	53
4.4.2. Mallado de la geometría.....	53
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
5.1. LISTADO DE MATERIALES OBTENIDOS POR METODOLOGÍA DE ASHBY	55
5.2. SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE ELEMENTO PARA SIMULAR... ..	58
5.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL MATERIAL AISLANTE.....	61
5.4. TIEMPO REQUERIDO PARA LA FUNDICIÓN DEL LDPE.....	65
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFIA	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales propiedades del LDPE.....	16
Tabla 2: Velocidades de extrusión en cm/min	19
Tabla 3: Conductividad de diferentes materiales	21
Tabla 4: Dimensiones del CAD para la simulación	37
Tabla 5: Propiedades térmicas de los materiales para la simulación	37
Tabla 6: Coordenadas de interfaces entre cada material	39
Tabla 7: Requerimientos para selección de materiales metodología de Ashby	47
Tabla 8: Sensores y sus coordenadas de ubicación	54
Tabla 9: Propiedades de los aislantes obtenidos	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los polímeros	14
Figura 2: Estructura polímeros termoplásticos.....	14
Figura 3: Estructura polímeros termoestables	15
Figura 4: Estructura elastómeros	15
Figura 5: Proceso de extrusión de ariete	18
Figura 6: Equilibrio térmico entre los cuerpos.....	20
Figura 7: Conducción en una pared plana	21
Figura 8: Convección natural	23
Figura 9: Convección forzada	23
Figura 10: Resistencias térmicas en una pared.....	25
Figura 11: Gráfico de Ashby de resistencia a la tracción contra módulo de Young para diferentes tipos de materiales.....	28
Figura 12: Etapas de selección metodología Ashby.....	29
Figura 13: División de la geometría en un número de elementos	31
Figura 14: Procedimiento para solución mediante elementos finitos.....	32
Figura 15: Esquema del dispositivo para la simulación	36
Figura 16: Esquema de las propiedades térmicas y condiciones de frontera del dispositivo	37
Figura 17: Conductividad térmica vs Temperatura máxima de servicio.....	48
Figura 18: Densidad vs precio.....	49
Figura 19: Modelo CAD del dispositivo	50
Figura 20: Mallado obtenido para la geometría del dispositivo en forma isométrica	52
Figura 21: Mallado obtenido en forma bidimensional	52
Figura 22: CAD para simulación de fundición de LDPE.....	53
Figura 23: Mallado para simulación de fundición del LDPE.....	54
Figura 24: materiales obtenidos mediante la gráfica de conductividad vs temperatura máxima de servicio	55
Figura 25: Materiales obtenidos mediante la gráfica de densidad vs precio	56
Figura 26: Variación de la temperatura para los diferentes tipos de elementos con respecto al modelo analítico	58
Figura 27: Variación del número de elementos para cada tipo de elemento.....	59
Figura 28: Variación del total de nodos según el tipo de elemento	59
Figura 29: Diferencia de temperaturas exterior e interior para cada tipo de elemento ...	60
Figura 30: Gráfica de temperatura exterior contra espesor de cada material aislante.....	61
Figura 31: Costo de cada material aislantes según su espesor	63
Figura 32: Perfil de temperaturas para el material seleccionado.....	64
Figura 33: Aproximación del modelo analítico y el modelo en ANSYS.....	65
Figura 34: Perfil final de temperaturas del LDPE.....	66
Figura 35: Variación de la temperatura en función del tiempo para los diferentes sensores	66

*

RESUMEN

En el presente proyecto, se realizó un análisis térmico, para el diseño óptimo de las paredes del cilindro de un dispositivo de extrusión de ariete, para la reutilización de bolsas plásticas. Se establecieron las condiciones térmicas propias del material que compone las bolsas, condiciones del ambiente y los parámetros dimensionales del dispositivo.

Como primera etapa, se realizó la selección del material aislante adecuado para obtener las condiciones de funcionamiento deseadas, por medio de la metodología de Ashby y con la ayuda del software Granta EduPack, en donde los principales criterios de selección fueron la baja conductividad térmica y la máxima temperatura de servicio. Como variables secundarias se definió el costo del material y la densidad, con el fin de reducir el costo y la masa del material. En la segunda etapa con los materiales obtenidos, se realizó un modelo de transferencia de calor en estado estacionario, por medio del método de elementos finitos en ANSYS, para determinar el espesor óptimo de cada material, con el cual la temperatura exterior alcanzara un valor definido. Luego, se calculó el volumen correspondiente al valor de espesor, para determinar la cantidad en Kg del material y posteriormente el costo del mismo. Por medio del valor de espesor y costo, se estableció el material aislante óptimo para ser adecuado al dispositivo de extrusión de ariete

Como tercera etapa se analizó el proceso de fundición del material, teniendo en cuenta las condiciones de procesamiento del material. El análisis se llevó a cabo a un modelo por el método del método de elementos finitos en ANSYS para estado transitorio, con el fin de definir la cantidad de tiempo necesario, en donde la parte central del material alcanzara la temperatura de procesamiento.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de los desechos plásticos a nivel mundial, ha causado diferentes afectaciones a los ecosistemas. Uno de los más afectados es el ecosistema de los mares y océanos, los cuales reciben el 80% de los desechos provenientes de fuentes terrestres. En dichos ecosistemas, la presencia de megaplástico, macropástico, mesoplástico y microplástico se hace cada vez más grande, debido a la existencia de diferentes elementos de uso diario como: bolsas, empaques, ropa, elementos de aseo, neumáticos, etc. Este tipo de artículos disminuyen su tamaño durante su tiempo de uso pero no se degradan, ocasionando un gran impacto a las especies allí presentes debido a la absorción de componentes contaminantes y la interacción trófica entre ellos. Además, los microplásticos, son imposibles de eliminar del lecho marino. A pesar de la existencia de la foto-degradación, que es uno de los procesos naturales de degradación más eficientes, por encima de los procesos biológicos y químicos, este proceso solo es factible en lugares donde la cantidad de oxígeno y radiación solar es alta. Por lo cual, a altas profundidades oceánicas, la descomposición de los componentes plásticos es mucho más difícil. Sumado a esto, debido a la presencia de las corrientes marinas, junto con el tráfico marino de embarcaciones comerciales y turísticas, la expansión de estos desechos es aún más grande. Este tipo de residuos pueden permanecer en la superficie o ser arrastrados a diferentes profundidades, ya sea por su densidad o incrustación en algunas especies [1], [2].

Desde el punto de vista socioeconómico, los ecosistemas marinos permiten diferentes servicios al ser humano, por medio de algunos sectores como la pesca, el turismo y la acuicultura. Sin embargo, estos sectores son afectados por la mala gestión de los desechos plásticos generados por fuentes terrestres y oceánicas. Un caso recurrente es el de muchos microplásticos, que pueden reaccionar con otros compuestos tóxicos como iones metálicos, COP y antibióticos, que a la larga representan un riesgo inminente, tanto para los seres humanos como las especies marinas. El sector pesquero también se ve afectado por la aparición de especies invasoras, el lavado extra requerido y la baja calidad del pescado, que aumentan el costo y tiempo necesario para su producción. Esto se traduce en una menor demanda de dicho producto. [3].

Del mismo modo, en Colombia, el desecho con mayor presencia en las costas marítimas es el plástico de uso único, cuya cantidad generada presenta cifras de hasta 1.075.294 kg/día, en donde el promedio mundial es de 1.420.189 kg/día. Además, la falta de compromiso por parte de las regulaciones impartidas ha hecho que sea más complicado el manejo de los desechos. Esto hace que el país, se encuentre aún muy lejos de lograr gestionar esta problemática de la forma adecuada, por lo cual, es necesaria la aplicación de metodologías y

toma de decisiones más eficaces, para la gestión de desechos en las costas marítimas de todo el país.[4]

Por otra parte, el desarrollo de procesos de reciclaje aún no es competitivo debido a que la gestión de residuos tradicional ofrece bajos costos en el consumo de energía y manejo de los vertederos, además de la baja conciencia social que presenta la población del país. A pesar de las diferentes restricciones presentes, se ha logrado un mejor respaldo frente al desarrollo de nuevas metodologías para la reducción de los desechos plásticos por medio de organizaciones y entes gubernamentales.

Entre los principales enfoques propios para esta práctica, se encuentran la reutilización, el reciclaje mecánico, el reciclaje químico y la recuperación de energía. Uno de los procesos más destacados es el reciclaje mecánico, por su bajo costo tanto del producto como de la materia prima y la reducción del impacto ambiental, cuyo aporte significativo es la reducción de la cantidad de desechos en vertederos.[5].

Por medio del reciclaje mecánico, pueden ser reutilizados diferentes materiales y obtenerse un ahorro del consumo energético hasta de 60 MJ / kg de residuos plásticos reciclados, comparado con la producción desde cero del plástico virgen. Los requerimientos energéticos para producir materia prima a partir de material 100% reciclado, son muy bajos. Es posible economizar hasta del 96% de consumo de combustibles fósiles y reducir las cantidades emitidas de CO₂ hasta en un 75%, para plásticos comunes como polietileno, polipropileno y poliestireno. Esto, hace que el reciclaje mecánico sea una gran alternativa viable medioambientalmente, para la reducción de la aglomeración en vertederos [6] [7]. Sin embargo, las propiedades de las materias primas producidas están influenciadas por el método utilizado durante el proceso de reciclaje [8].

Asimismo, el desarrollo discontinuo, junto con la poca presencia de fuentes de información de tecnología, es también otro aspecto a tener en cuenta. Ya que deben expandirse soluciones que permitan reducir la cantidad de desechos que son generados, además de extraer los ya presentes en los sectores marinos. Por otro lado, aquellas tecnologías que son implementadas, no abarcan el problema de manera completa, lo que requiere algún tipo de mejora e inversión, la cual no puede ser ejecutada debido a los bajos recursos económicos propios de cada país [9].

Por lo tanto, es importante implementar nuevas alternativas para el manejo de los desechos plásticos a nivel mundial. El reciclaje mecánico se presenta como una de esas alternativas con procesos que involucran el moldeo de los plásticos reciclados. Por medio de estos procesos de reutilización, el enfoque está relacionado con la producción de diferentes piezas a baja escala, por ejemplo, para su uso en el área de las edificaciones. Es más, algunas aplicaciones interesantes del reciclaje mecánico, pueden estar relacionadas con los bloques armables de plástico o perfiles estructurales, usando bolsas plásticas recuperadas como materia prima.

Un aspecto importante para el diseño de máquinas de reciclaje mecánico es el análisis de las cubiertas de aislamiento, cuyos estudios se han enfocado en la optimización del consumo energético y la seguridad de los operarios, durante el proceso de moldeo. Existen otras áreas de aplicaciones térmicas, como la calefacción de viviendas, el almacenamiento de energía estacionaria y el calentamiento de hornos, en donde el análisis y correcta selección de los materiales aislantes de la cubierta y sus dimensiones, se ha traducido en reducciones de hasta el 60% de la demanda energética de los procesos, y por lo tanto, reducción en los costos de implementación de los mismos [10]–[12].

Por lo anterior, este proyecto propuso el análisis térmico de un cilindro de fundición de una extrusora de ariete, cuya aplicación está enfocada a la reutilización de las bolsas plásticas de LDPE, mediante un proceso de reciclaje mecánico. Para tal fin, se estableció un modelo analítico para el análisis de la temperatura a través de los materiales aislantes a partir de la ecuación de conducción de calor. Luego, se realizó una selección de los posibles candidatos para los materiales aislantes adecuados en el dispositivo, con ayuda del software Granta EduPack. Cabe destacar que, se utilizó la metodología de Ashby para la selección de materiales, en donde los principales criterios de selección fueron la baja conductividad térmica y la máxima temperatura de servicio. Como variables secundarias se definió el costo del material y la densidad, con el fin de reducir el costo y la masa del material.

Posteriormente, estos materiales fueron utilizados en un modelo de elementos finitos, con la ayuda del software ANSYS, para establecer el espesor con el que se alcanzarían una temperatura específica de 20°C en la parte exterior del dispositivo. Este valor de espesor se inició en 5mm para los materiales en forma de partículas y en 3 mm para el material en forma de fibra. Una vez que estos materiales alcanzaron dicha temperatura para un espesor definido, se calculó el volumen correspondiente, para determinar la cantidad en Kg del material y posteriormente el costo del mismo. Por medio del valor de espesor y costo, se estableció el material aislante óptimo para ser adecuado al dispositivo de extrusión de ariete.

Por último, se realizó una simulación del proceso de fundición idealizado para un cilindro macizo de bolsas plásticas, en donde fueron aplicadas las respectivas condiciones de frontera. Con este análisis, se estableció el tiempo conveniente para que la parte central del material alcance la temperatura de procesamiento para el proceso de moldeo.

Por consiguiente, la metodología implementada buscó el diseño óptimo para las paredes de un cilindro de fundición del dispositivo de extrusión de ariete. Con esto, se espera promocionar el estudio de materiales y sus dimensiones, para obtener diseños que sean más eficientes desde el punto de vista energético. Del mismo modo, se desea impulsar la implementación de procesos de reciclaje mecánico, que contribuyan a la reducción del problema ambiental generado los plásticos de un solo uso.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL

2.1. LOS POLÍMEROS

El principal componente de las bolsas plásticas, es el polietileno de baja densidad. Las bolsas plásticas están presentes en muchos sectores a nivel mundial, entre los cuales el más común, es el sector comercial, como principal material para el embalaje. Existen además un sinnúmero de aplicaciones en el sector de la salud, por sus propiedades higiénicas[13].

La palabra polímero es de origen griego, donde *poly* significa muchos y *mero* significa parte. Los polímeros son un material, formado por moléculas de cadena larga, cada una de estas cadenas, está formada a su vez por una serie de unidades básicas (macromoléculas), repetidas indefinidamente, las cuales son denominadas meros. Los polímeros generalmente, son obtenidos a partir del petróleo, el cual, es separado para obtener un hidrocarburo insaturado, denominado alqueno. Entre los alquenos se encuentran monómeros, como el eteno (etileno), buteno (butileno) y propeno (propileno), cuya principal característica de estas moléculas, es el doble enlace carbono-carbono, que permite la fácil reactividad con algunas sustancias, lo que lo hace adecuado para el proceso de polimerización por adición[14]. El proceso de polimerización, por adición o de crecimiento en cadena, consiste en la ruptura de los enlaces dobles o triples de los monómeros, para que se unan a su vez, con otros monómeros en iguales condiciones. Este proceso permite la formación, de cadenas largas de número indefinido de moléculas, lo que lo hace un proceso adecuado para la fabricación de polietileno y polipropileno[15]. Los polímeros provienen de compuestos de tipo orgánico, es decir, otros compuestos precursores, que contienen carbono[16].

Los materiales poliméricos, están caracterizados por su gran gama de aplicaciones, atribuidas en gran medida, a diferentes propiedades químicas, mecánicas, ópticas y térmicas muy particulares. Entre las cuales se encuentran, juguetes, electrodomésticos, recubrimientos, piezas estructurales, llantas para automóviles, espumas, etc. [17]. Además, los polímeros, son comúnmente utilizados como matrices para la fabricación de materiales compuestos. Entre otras aplicaciones, los polímeros abarcan también aplicaciones médicas ópticas y estructurales, por medio de la modificación de su estructura, para aplicaciones muy específicas, denominados polímeros de especialidad, como por ejemplo los auto-curables, auto-luminiscentes y con memoria de forma.

2.1.1. Clasificación de los polímeros

Existen diferentes tipos de clasificaciones para los polímeros, por ejemplo, la forma de sinterización de las moléculas, el tipo de estructura molecular o la familia química. Sin embargo, los polímeros comúnmente se clasifican con respecto a su comportamiento mecánico. Dicha clasificación cuenta con tres ramas, donde se encuentran los polímeros termoplásticos, polímeros termoestables y elastómeros (Figura 1).

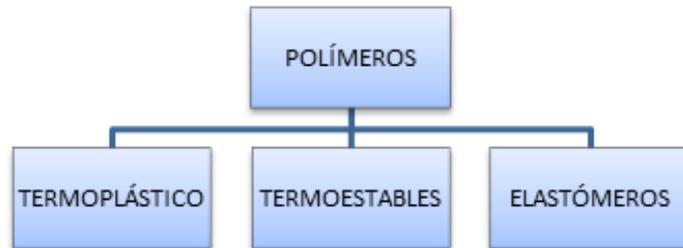


Figura 1: Clasificación de los polímeros
Fuente: Autor

Los polímeros termoplásticos, mantienen su estabilidad estructural a temperatura ambiente, sin embargo, su estado puede pasar a líquido viscoso, con la exposición a temperaturas altas, a partir de los 100°C. Este comportamiento, es causado debido al tipo de estructura que los forma, que son cadenas lineales flexibles formadas por monómeros (ver Figura 2). Esta es la principal característica, para su aplicación en un sin número de procesos, por su fácil manejo y bajo costo. Además, este tipo de estructura permite su sometimiento, a procesos de reciclaje, sin que se vea afectado. Un ejemplo de este tipo de materiales, es el polietileno.

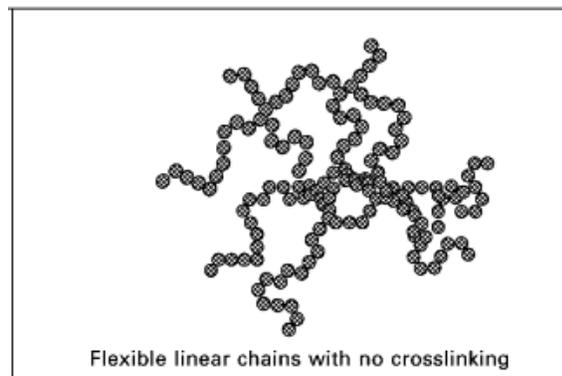


Figura 2: Estructura polímeros termoplásticos
Fuente: [18]

Los polímeros termoestables, a diferencia de los termoplásticos, no se ven afectado por la exposición a las altas temperaturas. Ya que a esas condiciones, se produce en ellos, una reacción química que tiende a endurecerlos. Sin embargo, esta característica se ve contrastada por su fragilidad. Este comportamiento ocurre, por estar formados por cadenas largas de

moléculas, que a su vez se entrelazan fuertemente de forma tridimensional (ver Figura 3). No se puede someter a procesos de reciclaje, debido a que este tipo de polímeros, se degradan. Un ejemplo de este tipo de materiales, es el poliuretano.

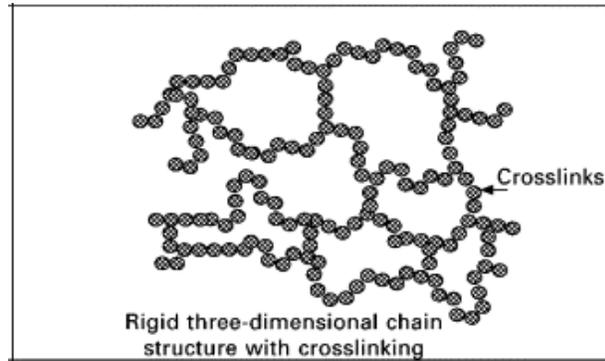


Figura 3: Estructura polímeros termoestables
Fuente: [18]

Los elastómeros, son los materiales de gran flexibilidad conocidos como caucho o hule. Se caracterizan principalmente, porque a pesar de ser sometidos, a grandes deformaciones elásticas débiles, pueden recuperar su forma sin verse alterados en su estructura. Dicha característica se debe a que los elastómeros, se componen de una estructura intermedia, entre termoplásticos y termoestables (Figura 4). La diferencia está basada, a que presentan una estructura similar a los termoestables, pero los enlaces de entrelazamiento se presentan en una forma más leve, sin llegar a asemejarse a los termoplásticos. Un ejemplo de este tipo de materiales, es el caucho natural[16], [17].

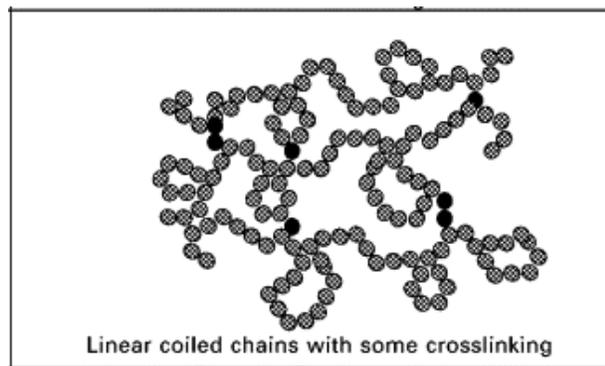


Figura 4: Estructura elastómeros
Fuente: [18]

2.1.2. Polietileno de baja densidad LDPE

El polietileno de baja densidad, con estructura molecular $CH_2 - CH_2$, cuya estructura se repite indefinidamente. Pertenece a la familia de las poliolefinas, donde además se encuentra el polipropileno. El LDPE, puede ser obtenido mediante el proceso de polimerización por adición a partir del etileno, con el uso de valores de presión y temperatura determinados,

junto con un catalizador. Sin embargo, existen otros procesos para la obtención del polietileno, entre los que se encuentran el proceso Ziegler-Natta, el proceso Phillips, el proceso de petróleo estándar (Indiana) y el proceso de metaloceno[19], [20],[21].

El LDPE es el principal material utilizado para películas flexibles, por encima del polietileno de alta densidad (HDPE), debido a que el LDPE presenta mejores características como la suavidad, flexibilidad y elasticidad. Entre las principales aplicaciones de estas películas flexibles, se encuentran panadería, congelados, frescos, carne y aves, además de productos de confitería. Este tipo de plásticos son utilizados comúnmente en embalaje y productos para envasado, por su capacidad de bloqueo de vapor de agua[22]. Entre otras características se encuentran, temperatura de fusión entre los 98-115°C, conductividad térmica 0.55 w/m k (fundido) y una viscosidad de 54500 Pa*s (fundido), entre otras propiedades que se muestran en la Tabla 1 [23].

Tabla 1: Principales propiedades del LDPE

Propiedad	Valor intervalo
Densidad	924.5 ± 7.5 Kg/m ³
Módulo de Young	0.1775 ± 0.0055 GPa
Módulo de compresión	0.1775 ± 0.0055 GPa
Módulo de flexión	0.2855 ± 0.0445 GPa
Razón de Poisson	0.448 ± 0.009
Limite elástico	11.73 ± 2.77 MPa
Esfuerzo de tensión	19.85 ± 6.55 MPa
Porcentaje de elongación	375 ± 275
Temperatura de transición vítrea	-107.5 ± 17.5 °C
Punto de fusión	106.5 ± 8.5 °C
Temperatura de fundición para procesamiento	176.5 ± 55.5 °C
Máxima temperatura de servicio	88 ± 7 °C
Mínima temperatura de servicio	-63 ± 5 Kg/m ³
Calor específico	1.88 ± 0.04 KJ/Kg °C
Coefficiente de expansión térmica	288 ± 108/°C

Fuente: Adaptado de Granta EduPack

Por otro lado, el caso de la conductividad térmica, depende además de los valores de la presión, a los cuales el material está sometido, de forma directamente proporcional. La mayoría de los polímeros, al ser fundidos, tienen características de flujo de tipo no newtoniano. El procesamiento de polímeros, se basa mayormente el flujo de corte. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta este tipo de comportamiento para el diseño de las máquinas y matrices, para el procedimiento de los mismos[24].

2.1.3. Procesos de manufactura de plásticos

El procesamiento de los plásticos, es llevado a cabo de forma similar a la manufactura de los metales, ya que son aplicados relativamente los mismos principios, basándose el

tratamiento del material, fundido o semifundido. El procesamiento del caucho abarca desde el siglo XIX, en cambio, el de los plásticos como tal, empezaron a surgir a partir de los años 20, donde hasta los años 40 el procesamiento fue mejorado, por medio de la fabricación de dispositivos y maquinaria especializada a gran escala. El procesamiento de materiales termoplásticos, se basa en su fundición, por otra parte, los materiales termofijos, son tratados a bajas temperaturas, mediante el proceso denominado curado. Sin embargo, el procesamiento de los plásticos no es tan exigente a diferencia de los metales, debido a que los requerimientos de energía, no son tan grandes.

Los plásticos permiten un sin número de procesos de maquinado, fundición, moldeo soplado y formado. Además, el número de operaciones requerido no es tan grande, lo cual, se traduce a facilidad de producción en masa. El procesamiento de los termoplásticos, comienza por la fundición, de los pellets, gránulos o polvos, justo antes de realizarse su moldeo. Para los termofijos, se utilizan polímeros, que se solidifican al ser curados. Actualmente, con la toma de conciencia ecológica, el material reciclado es cortado y limpiado, para su reprocesamiento, sin embargo, existe una diferencia de calidad en el producto final.

- **Extrusión**

La extrusión, consiste en forzar a un material, generalmente de buena ductilidad, a pasar por una matriz, el cual contiene una preforma determinada. Se parte con el vertimiento por una tolva, de los pellets o material granulado, donde al llegar al barril o cilindro de fundición, el material alcanza el estado viscoso entre 40 y 200° C. Por la acción de un tornillo sinfín, es transportado al orificio, donde el material adquiere la forma, de la sección transversal. Este proceso generalmente se usa en materiales termoplásticos, donde la forma del producto, se caracteriza por secciones continuas de gran extensión, permitiendo fabricar tuberías, perfiles y componentes estructurales. Entre otras aplicaciones se encuentra la fabricación de películas, filamentos y recubrimientos de cables eléctricos.

- **Inyección**

El moldeo por inyección, al igual que la extrusión, se basa en la fundición del material en un cilindro, el cual sufre calentamiento, de forma más significativa debido a la fricción, aunque las fuentes de calor externas también intervienen en el proceso. El material es transportado hacia la sección final del cilindro, por un tornillo o sistema hidráulico, donde se halla un preforma, impresa en un molde. Las presiones en este proceso alcanzan valores entre los 70 a 200 MPa. El molde generalmente tiene una temperatura, la cual, para materiales termoplásticos, tiene un valor de 90 °C, en cambio para materiales termofijos la temperatura es de 200 °C. Entre los productos que pueden obtenerse por medio de este proceso, se encuentran los contenedores, mangos para herramientas, perillas, juguetes, etc.

- **Moldeo por soplado**

Este proceso consiste en la extrusión de una preforma, la cual es introducida en un molde exterior, donde dicha preforma, es soplada con un gas a presión, para que tienda a expandirse, por la acción de la presión y adquiera la forma final del molde. El gas utilizado es generalmente aire caliente a una presión de 350 a 700 KPa. Por medio de este proceso se pueden alcanzar hasta volúmenes de 2000 litros. Este tipo de proceso se utiliza para la fabricación de botellas. Existen otras variantes del proceso, como el soplado por capas múltiples, moldeo por inyección y soplado, moldeo por ensanchado y soplado[25], [26].

- **Extrusión de ariete (Ram Extrusion)**

Consiste en la aplicación de presión, por medio de un pistón, a un material polimérico, que es fundido en una matriz cilíndrica (ver Figura 5). El dispositivo consta de cinco elementos principales entre los que se encuentran el sistema de acondicionamiento (hidráulico o neumático), el pistón, el troquel, la fuente de calor y el sistema de alimentación. El proceso puede llevarse a cabo mediante orientación horizontal y vertical a diferentes escalas, llegándose a necesitar valores de hasta 150 MPa, donde las relaciones de reducción de la geometría del dispositivo son de un valor considerable [27].

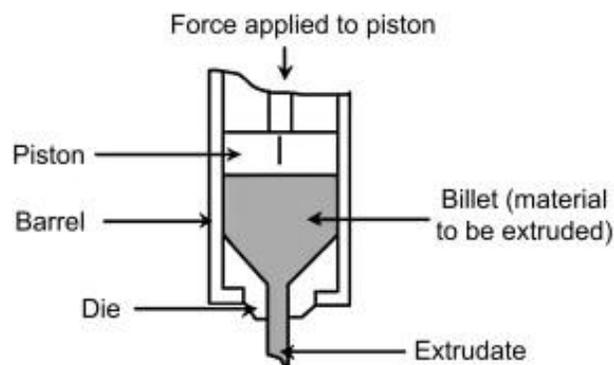


Figura 5: Proceso de extrusión de ariete
Fuente:[28]

Los principales parámetros presentes son el valor de la velocidad de avance, temperatura y presión sobre el material, los cuales afectan en gran medida, las propiedades mecánicas del material extruido. Con el manejo adecuado de estos parámetros se obtiene mejor uniformidad en el material y reducción de defectos superficiales. Además, por medio del uso de la contrapresión, se puede reducir el cizallamiento provocado, por el contacto del material con la matriz, para evitar malformaciones y reducción de las propiedades mecánicas[29].

La velocidad de extrusión depende generalmente, del tamaño y forma del tocho y la resina, donde es necesario tener en cuenta, que en caso de que, si es aumentada, existen problemas de porosidad y de baja densidad, debido al aire contenido en la parte interior. Por el contrario, si se reduce para obtener mejores propiedades del producto final, se pone en riesgo la

capacidad de producción. La velocidad es establecida según el diámetro, también debe tenerse en cuenta su variación con respecto al tramo del cilindro (ver Tabla 2)[30] .

Tabla 2: Velocidades de extrusión en cm/min

Tramo-diámetro	> 8 cm	< 8 cm
Inicial	25	25
Medio	5	5
Final	5	1

Fuente:[30].

Este proceso generalmente es utilizado, para polímeros granulados difíciles de procesar, como el PE-UHMW y PTFE. Por características como un coeficiente de fricción bajo o alta viscosidad, este tipo de materiales no son procesados por extrusión de tornillo. Debido a que este tipo de materiales se presentan en forma granular, el producto extruido puede ser un sólido o una pasta, la cual, requiere de un proceso de sinterizado, el cual puede llegar hasta los 300° C según las necesidades del material. A pesar de un valor de presión mucho más alto, el valor de la temperatura a diferencia de la extrusión de tornillo esta entre los 40 y 60 grados[31].

Los principales defectos presentes al llevar a cabo este proceso dependen de la distribución uniforme de la temperatura, la inadecuada cantidad de material suplido al sistema, la falta de uniformidad en la superficie interna de la cámara y la defectuosa capacidad del material para soportar la presión interna ejercida por el pistón[32]. Además, el valor de la energía suministrado al material, debe tener valores adecuados, ya que, al ser expuesto a temperaturas altas, de la requerida, el material tiende a degradarse. Por otro lado, debido a que la conductividad térmica de los plásticos es muy baja, el material tiende a comportarse aproximadamente como un aislante[28].

2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

EL calor es una forma de transferir energía, donde su principal característica es determinada, por la existencia de una diferencia de temperaturas, debido a la ley cero de la termodinámica, las temperaturas entre los sistemas, se tiende a equilibrar, por lo que ocurre un proceso de transferencia de energía entre ellos (Figura 6) [33]. Este proceso a su vez, es compatible la segunda ley de la termodinámica, debido a que el cuerpo que contenga mayor energía, la transfiere a uno que contenga una menor cantidad, es decir, el proceso no puede llevarse a cabo de forma inversa.

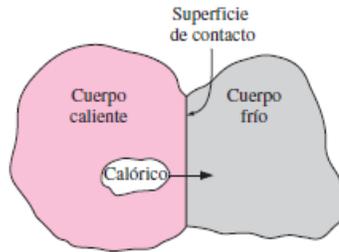


Figura 6: Equilibrio térmico entre los cuerpos
Fuente: [34]

Para la transferencia de calor, existen tres mecanismos, el primero es la conducción, que se desarrolla de forma molecular, con la vibración de las mismas, el cual es propio de materiales sólidos. El segundo mecanismo es la convección, que se lleva a cabo en fluidos como el aire o el agua, donde sus moléculas por naturaleza, tienen un mejor grado de libertad, es decir el calor se transfiere, con el movimiento de las moléculas, lo que lo hace un mecanismo observable y de tipo macroscópico. La convección puede ser de tipo natural, donde el movimiento del fluido, es debido al cambio de densidad otorgado, por la misma absorción de energía, o la convección de tipo forzada, que es debida a la presencia de un agente externo, el cual modifica el movimiento del fluido, dándole al fluido una mejor capacidad de transferencia de calor. El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, donde no es necesario un medio, debido a que el calor es transmitido en forma de ondas[35], [36].

2.2.1. Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción, consiste en la excitación molecular, sin movimiento de materia[37]. Se da a través de un material sólido, sometido a un delta de temperatura, entre dos superficies planas, separadas una distancia determinada, la cual corresponde al espesor de la placa o pared. Este fenómeno, está regido por la ecuación de conducción de Fourier (ver Ecuación (1)).

$$Q_{cd} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde Q_{cd} , representa la tasa de transferencia de calor, k el coeficiente de conductividad térmica del material, A el área transversal de la pared o placa, ΔT , la diferencia de temperatura entre las dos superficies, Δx representa el espesor de la pared[38]. Este es el ejemplo de conducción más simple, que se muestra en la Figura 7.

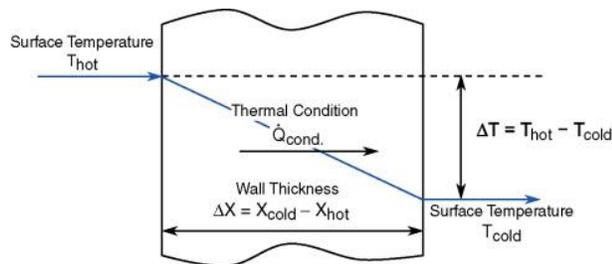


Figura 7: Conducción en una pared plana
Fuente:[38]

El coeficiente de conductividad, es una propiedad de cada material, el cual entre mayor sea, mejor es la capacidad de dicho material, para conducir el calor. Además esta capacidad también se basa, en el movimiento de los electrones libres, lo que hace que los metales sean buenos conductores[39]. Por el contrario, cuando un material tiene una conductividad muy baja se considera aislante, debido a la poca capacidad de transferir el calor. La Tabla 3 muestra, algunos valores de materiales comunes donde se puede notar su capacidad de transferir el calor.

Tabla 3: Conductividad de diferentes materiales

Material	Conductividad (W/ m °C)
Diamante	2300
Cobre	401
Aluminio	237
Vidrio	0.78
Agua	0.607
Madera	0.17
Fibra de vidrio	0.043
aire	0.026

Fuente: Adaptado de [34]

La conductividad térmica depende de diferentes factores entre los que se encuentran la temperatura, el tamaño de grano, la estructura cristalina, la composición química, la porosidad y la humedad. Para la temperatura, la conductividad se ve afectada, la cual entre mayor sea, mejor es la conductividad del material, dicho valor cuenta con un pico donde se mantiene estable, ya que, si el valor de la temperatura sigue aumentándose, la conductividad disminuye, hasta alcanzar un valor de temperatura próximo al de fusión del material. Para el tamaño de grano, entre mayor sea, mejor es la conductividad. Para materiales de configuración cúbica, su conductividad térmica, no depende de la orientación de dicha estructura, a diferencia de otros materiales, que se comportan anisotrópicamente para otro tipo de estructuras. La composición del material afecta la conductividad, de forma, que entre más simple sea su estructura, dicho valor es mayor, que uno cuya estructura es más compleja. La porosidad de un material afecta la conductividad, debido a la inserción del aire, el cual cuenta con una conductividad más baja, por lo tanto, entre mayor sea su valor de porosidad, menor es su conductividad. Sin embargo, debe analizarse la forma de los poros, su tamaño y conexión entre los mismos. La humedad también afecta la conductividad de los materiales,

debido a que, si su humedad es alta, su conductividad también lo es, por el contenido de agua y su conductividad mayor incluso si es congelada [40], [41].

La conductividad de compuestos gaseosos de baja densidad es mayor, si la temperatura también aumenta. En cambio, para líquidos, ocurre de forma inversa. Cuyos valores son muy pequeños comparados con los materiales sólidos[42]. Para materiales poliméricos, la conductividad determina la tasa de enfriamiento y como consecuencia el nivel de cristalinidad del material. Este parámetro es modificado, mediante el uso de los llamados agentes nucleantes, que se encuentran en escalas nano y micrométricas. Con la adición de estos agentes como talco, óxido de titanio y nitruro de boro, se puede duplicar o hasta quintuplicar su conductividad térmica[43].

2.2.2. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección, a diferencia de la conducción, se da entre un sólido y un fluido en movimiento[44]. Dicho fluido actúa como un agente de enfriamiento o de calentamiento de un sólido, el fenómeno está regido por la ecuación de convección de Newton (ver Ecuación (2)).

$$\dot{Q}_{cv} = hA\Delta T \quad (2)$$

Donde A , representa el área superficial, ΔT la diferencia de temperaturas superficial y del líquido circundante respectivamente, y h el coeficiente de transferencia de calor. Este coeficiente depende de diversos factores, entre los que se encuentran la velocidad de fluido, el tipo de flujo, la geometría de la superficie, y las propiedades del fluido, como la densidad o velocidad[45].

La convección se puede dar de forma natural o forzada, la convección natural (Figura 8) está determinada, por el desplazamiento que sufren los fluidos, por diferencias de temperatura, al cambiar su densidad[38]. Cuyas aplicaciones son la ventilación de aire y el almacenamiento térmico y en el diseño para aplicaciones nucleares. Además, este proceso, se caracteriza por ser un proceso eficiente, y no requerir de una fuente de energía continua[46].

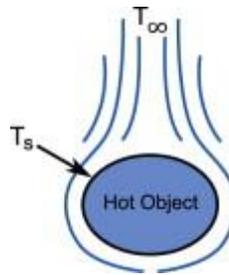


Figura 8: Convección natural
Fuente:[38]

Por otra parte, la convección forzada (Figura 9), está determinada por la influencia de algún dispositivo externo. El cual puede ser una bomba, un ventilador o cualquier otro dispositivo. Generalmente estos sistemas son aplicados en refrigeración o calefacción[38].

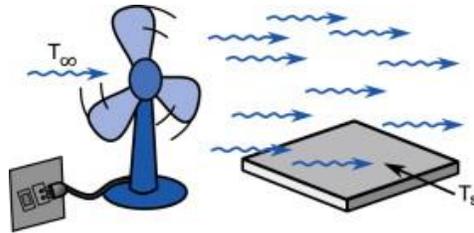


Figura 9: Convección forzada
Fuente:[38]

En la convección forzada debe tener en cuenta, el tipo de superficie donde el fluido incide, inclusive el comportamiento del flujo. Por lo tanto, se utilizan relaciones adimensionales, donde ese tiene en cuenta, los diferentes parámetros que influyen en el coeficiente de transferencia de calor. Una de las principales es el número de Nusselt, el cual relaciona la conducción, con la convección de un fluido (ver ecuación (3)). Otra de las relaciones utilizadas es el número de Reynolds, esta relación establece cuál es el tipo de flujo característico de un fluido, ya sea laminar o turbulento (ver ecuación (4)). Por último se encuentra el número de Prandtl, donde se relacionan la difusión de cantidad de momento y la difusividad térmica (ver ecuación (5)). [47].

$$Nu = \frac{hl}{k} \quad (3)$$

Donde l , representa la longitud característica, h el coeficiente de transferencia de calor del fluido, k la conductividad térmica el material.

$$Re = \frac{\rho vl}{\mu} \quad (4)$$

Donde ρ , representa la densidad del fluido, v la velocidad del fluido en el medio, l la longitud característica y μ la densidad del fluido.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5)$$

Donde C_p representa la capacidad calorífica del fluido, μ la densidad del fluido y k la conductividad térmica el material.

2.2.3. Ecuación de conducción de calor

La ecuación diferencial de conducción de calor, rige el comportamiento de la temperatura, a lo largo de una geometría. La cual permite llevar a cabo, el análisis para las diferentes condiciones, como la generación, la variación del tiempo y distancia. Dicha ecuación está establecida para las tres coordenadas: cartesiana (ver ecuación (6)), cilíndrica (ver ecuación (7)) y esférica (ver ecuación (8)).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + e = \frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + e = \frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + e = \frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} \quad (8)$$

2.2.4. Conducción de calor en estado estable

La transferencia de calor en estado estable, se caracteriza, por la no existencia, de un cambio de temperatura, en el medio donde se transmite en función del tiempo. Por lo tanto, el calor que ingresa a dicho medio, es igual al que sale, por definición de balance de energía. Por lo tanto, para llevar a cabo el análisis, solamente es necesario, considerar el cambio de temperatura, en función del espacio. Teniendo en cuenta dichos parámetros, la ecuación (6) se reduce a la ecuación (9).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{e}{k} = 0 \quad (9)$$

De forma similar, se realiza el análisis para las demás coordenadas, las cuales finalmente pueden reducirse, a su forma unidireccional, con solo tener en cuenta, la dirección necesaria para el análisis.

- **Método de las resistencias térmicas**

En el análisis de la transferencia de calor, en estado estable, se hace uso del concepto de resistencia térmica. Este método permite la determinación, del comportamiento de la temperatura, a través de diferentes geometrías y medios. Este concepto tiene una analogía con el de resistencia eléctrica, donde el calor es representado por la corriente eléctrica, que se mantiene constante y la diferencia de potencial, representa la diferencia entre temperaturas en dos puntos, cuyos parámetros están relacionados por la ley de Ohm (Figura 10).

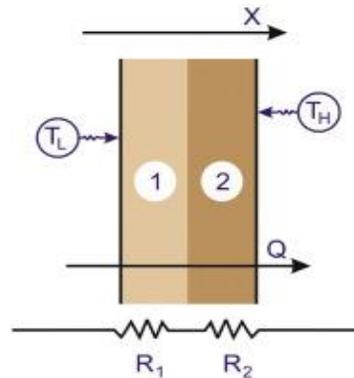


Figura 10: Resistencias térmicas en una pared
Fuente:[37]

Entre la ecuación de voltaje para la ley de Ohm (ver ecuación (10)) y la ecuación de temperatura para resistencia térmica (11) puede notarse la analogía entre los dos conceptos, sin embargo, el valor de dicha resistencia, cambia según la geometría del cuerpo, ya sea una pared, un cilindro o una esfera. Incluso la convección del ambiente, puede ser representado por medio de una resistencia térmica.

$$\Delta V = IR \quad (10)$$

$$\Delta T = QR_t \quad (11)$$

Entre las diferentes formas de resistencia térmica se encuentran: Pared plana (ver ecuación (12)), donde L representa el espesor de la pared, k la conductividad térmica de material y A el área trasversal perpendicular al flujo.

$$R = \frac{L}{kA} \quad (12)$$

Para un cilindro (ver ecuación (13)), donde r_2, r_1 los radios externos e internos respectivamente, L representa la longitud del cilindro, y k la conductividad térmica de material.

$$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (13)$$

Para una esfera (ver ecuación (13)), donde r_2, r_1 los radios externos e internos respectivamente y k la conductividad térmica de material.

$$R = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k} \quad (14)$$

Para una superficie en convección (ver ecuación (15)). h el coeficiente de convección del medio externo, y A_s , el área superficial del cuerpo o medio expuesto al medio externo[37].

$$R = \frac{1}{hA_s} \quad (15)$$

2.2.5. Conducción de calor en estado transitorio

En este tipo de régimen, se debe tener en cuenta, a diferencia del estable, la inclusión de la variación de la temperatura en el tiempo. Por lo tanto, la complejidad de los modelos aumenta. Sin embargo, existen cuerpos por cuyas condiciones propias, se comportan de tal forma, que no existe una variación significativa, de la temperatura con respecto a la distancia, es decir, su distribución de temperatura sólo depende del tiempo. A este tipo de cuerpos se les denomina cuerpos concentrados.

Los cuerpos concentrados se analizan, por medio de un parámetro adimensional, denominado número de Biot (ver ecuación (16)). Donde para que un cuerpo sea considerado concentrado, el valor obtenido de dicho parámetro, debe ser menor o igual a 0.1. Lo cual significa que la conducción, es mucho mayor que la convección otorgada, por la convección de los alrededores.

$$Biot = \frac{hL_c}{k} \quad (16)$$

Donde h representa la convección de los alrededores del cuerpo, L_c la longitud característica de dicho cuerpo, k la conductividad térmica del cuerpo. La longitud característica, depende de la geometría propia de cada cuerpo, la cual, puede ser calculada, con el cociente del volumen del cuerpo y el área de superficial sometida a la convección. Cuando el cuerpo cumple con ser un cuerpo concentrado, la variación de la temperatura puede ser obtenida mediante el análisis por medio de la ecuación (17).

$$\theta = \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt}; \text{ donde } b = \frac{hA_s}{\rho V C_p} \quad (17)$$

Donde T_∞ , representa la temperatura del exterior, T_i la temperatura inicial, A_s el área superficial, ρ la densidad del cuerpo, V el volumen, y C_p el calor específico del material.

Para el caso en que el cuerpo el número de Biot, sea mayor al establecido, para cuerpos concentrados, cuando se quiera tener una mejor aproximación, es necesario en el análisis, la inclusión de la variación de la temperatura con la distancia. En consecuencia, se introduce otro parámetro adimensional, denominado el número de Fourier (ver ecuación (18)), el cual relaciona el tiempo, la difusividad térmica del material y la distancia.

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (18)$$

Para determinar la temperatura de un cuerpo, teniendo en cuenta la distancia y el tiempo, donde todas las superficies están sometidas a convección, para las una pared plana y un cilindro puede ser determinado por las ecuaciones (19) y (20).

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\text{sen}(\lambda_n)}{2\lambda_n + \text{sen}(2\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 Fo} \cos(\lambda_n x/L) \quad (19)$$

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\lambda_n)}{\lambda_n J_0^2(\lambda_n) + \lambda_n J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 Fo} J_0(\lambda_n r/r_0) \quad (20)$$

Donde λ_n es un coeficiente propio en función del número de Biot. J_0, J_1 , representan las funciones de Bessel de primera clase, cuyos valores se obtienen de forma tabular.

Las ecuaciones representan las aproximaciones, para un número indefinido de términos. Sin embargo, para números de Fourier mayores a 0.2, el error de truncamiento es alrededor del 2%. Por lo tanto, es posible determinar los valores de temperatura, por medio del uso de un solo término, donde las ecuaciones se reducen a la ecuación (21) para una pared plana y la ecuación (22) para un cilindro.

$$\theta = A_1 e^{-\lambda_1^2 Fo} \cos(\lambda_1 x/L) \quad (21)$$

$$\theta = A_1 e^{-\lambda_1^2 Fo} J_0(\lambda_1 r/r_0) \quad (22)$$

De igual forma, los valores de $A_1, \lambda_1 J_0$ son determinados de forma tabular, por medio del número de Biot, ya que estos valores están dados en función de dicho parámetro. Además, pueden ser determinados de forma aproximada gráficamente [34].

2.3. METODOLOGÍA DE ASHBY

La metodología de Ashby, la define las necesidades de diseño presentes, para redefinirlas en índices de desempeño que corresponde a la propiedad relacionada con la necesidad. En esta metodología se asigna una propiedad a uno de los dos ejes coordenados correspondientes en un gráfico bidimensional, donde los materiales están distribuido en forma de burbujas (ver Figura 11). Posteriormente, para realizar los diferentes filtros de acuerdo a los requerimientos, se definen los límites numéricos que son establecidos por las restricciones propias del diseño. Los materiales cuyas propiedades estén por fuera del intervalo establecido por las restricciones, son descartados, para de esta forma reducir la cantidad de materiales, hasta encontrar un pequeño grupo que cumpla con las condiciones deseadas.

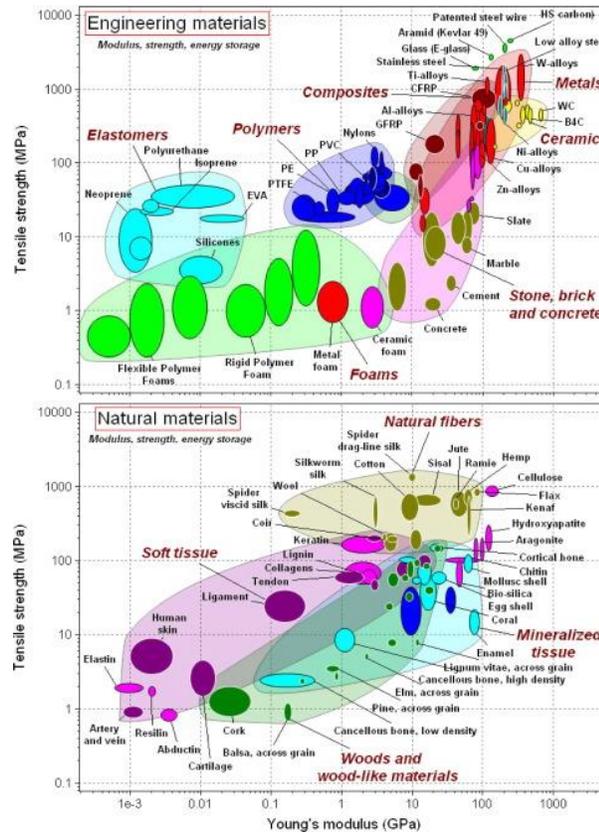


Figura 11: Gráfico de Ashby de resistencia a la tracción contra módulo de Young para diferentes tipos de materiales
Fuente: [48]

La metodología de Ashby es ampliamente utilizada debido a diferentes ventajas presentes a la hora de usar este método, entre las que se encuentran:

- Recuperación de las propiedades de un material particular
- Comparación rápida de propiedades entre diferentes materiales
- Permite el análisis de la potencial sustitución de un material a otro[48], [49].

Para la aplicación de metodología de selección, Deben seguirse ciertos lineamientos que permiten la realización de un proceso óptimo y eficaz. En la Figura 12 se muestran las etapas recomendadas para llevarla a cabo.



Figura 12: Etapas de selección metodología Ashby
Fuente: [50]

2.3.1. Traducir requisitos de diseño

La traducción de los requerimientos desde el lenguaje corriente al técnico definiendo propiedades específicas con sus respectivos valores, es la primera fase de la selección de un material por medio de la metodología de Ashby. Este proceso se divide en 4 pasos, entre las que se encuentran la función, Limitación, objetivo y variables libres.

- **Función**

La función se refiere a la principal condición a la que va a ser sometido el material, este paso define además la propiedad ligada a dicho requerimiento y su valor característico. La función puede ser una o más características, que deba tener el material para su aplicación.

- **Limitación**

La limitación se caracteriza por definir las características de segundo nivel que debe cumplir el material, pero que juegan un papel muy importante en el rendimiento para un determinado entorno, además de hacer que un diseño pueda llevarse a cabo. Por lo tanto se definen como dimensiones, valores específicos esfuerzos, propiedades mecánicas, químicas o físicas, etc. Al ser condiciones fijas no son alterables y deben cumplirse obligatoriamente al igual que la función.

- **Objetivo**

El objetivo se refiere a las propiedades o características que se desean maximizar o minimizar según el caso, las propiedades mayormente definidas son la densidad y el costo.

- **Variable libre**

Las variables libres son las características adicionales que no influyen en el rendimiento del material, pero que sirven como complemento a la hora de su aplicación. Generalmente se utilizan variables como textura, color, apariencia, etc.

2.3.2. Selección usando materiales

En este paso, se definen cuáles son los grupos de materiales de donde se parte para realizar la selección, como lo pueden ser polímeros, cerámicos, metales, etc., para comenzar a aplicar las restricciones definidas en la etapa anterior. La aplicación de las restricciones es en el mismo orden en que son definidas, donde los materiales que no cumplan con las condiciones, es decir se encuentren por fuera de los límites definidos, son descartados. De esta forma se obtiene un número de materiales adecuados para el diseño, que se reduce progresivamente a medida que son aplicadas dichas restricciones.

2.3.4. Priorización usando objetivos

La priorización usando objetivos, es la ponderación según los objetivos definidos, que puede ser de forma ascendente o descendente según las necesidades del diseño, donde generalmente se seleccionan los materiales de menor densidad y menor costo de adquisición.

2.3.5. Documentación

En la documentación se da otra perspectiva a la otorgada por la selección, donde se analiza desde el punto de vista comercial y de anteriores estudios, las características disponibles de los materiales y como estas pueden afectar el diseño. Así se da una vista más generalizada de cada material para de esta forma determinar si su selección es viable y pueda llegar a cumplir los objetivos fijados.

2.3.6. Material final

Esta es la fase final donde se define, cual es el material que cumple con todas y cada una de las características establecidas en cada etapa anterior, donde por lo general el factor decisivo se debe a condiciones locales como proveedores, disponibilidad en el mercado, tiempo de entrega y el respaldo otorgado por su fabricante.[50]

2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos, surgió como una alternativa a la solución de problemas estructurales, para la construcción de elementos aeroespaciales en los años 50's. Sin embargo, para esta época el avance tecnológico no permitía la solución de sistemas mucho más complejos, debido a que este método se basa en la solución de ecuaciones algebraicas simultáneas, con un número de incógnitas muy alto. A partir de los años 80's, el método se empezó a implementar en gran medida, con el avance computacional de la época, hasta la actualidad, donde es un método muy popular para la solución de problemas ingenieriles, que abarcan diferentes áreas, como la mecánica fluidos, análisis estructural, la transferencia de calor, la aerodinámica y la electrostática.

El método de elementos finitos, consiste en realizar una aproximación lo más cercana posible, a las ecuaciones propias que rigen un determinado fenómeno. Para el caso de la transferencia de calor, se realiza una aproximación, a la ecuación diferencial de transferencia de calor, ya sea de forma unidireccional, bidimensional, incluso tridimensional. Por la gran complejidad presente para la solución, de este tipo de ecuaciones diferenciales parciales, se realiza una división en pequeñas secciones o elementos, las cuales presentan subdominios del elemento general (Figura 13).

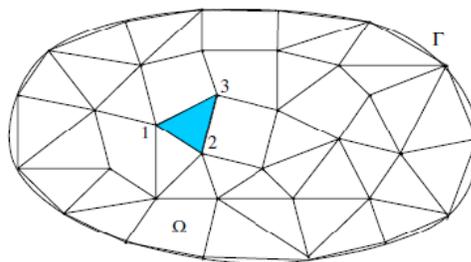


Figura 13: División de la geometría en un número de elementos
Fuente: [51]

Una vez realizada la división en los elementos, se aplica el enfoque de Galerkin. El cual, utiliza el cálculo de un residuo, con el establecimiento y selección de ecuaciones adecuadas para la aproximación, las cuales se ajustan para obtener una solución más aproximada. Posteriormente se realiza un ensamble, donde se unifican los pequeños elementos, para establecer la continuidad de la solución. Seguidamente se establecen las condiciones de frontera, que influyen en el proceso, para con dichas condiciones, finalmente el sistema es

expresado en forma matricial, para la aplicación de cualquier tipo de método iterativo para solucionar el sistema. Una vez solucionado, se lleva a cabo el procesamiento posterior, para la muestra de datos de una forma gráfica (Figura 14).

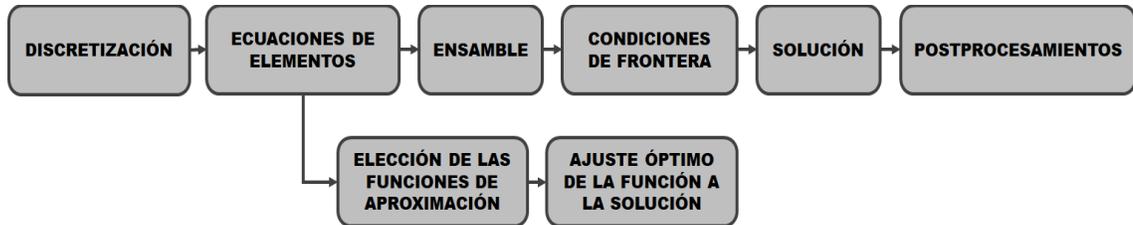


Figura 14: Procedimiento para solución mediante elementos finitos
Fuente: [52]

Los problemas de este tipo son muy similares a la solución de problemas de tipo estructural mecánico, existiendo una analogía del comportamiento entre la fuerza y deformación, con el calor y la temperatura respectivamente[52].

Entre las principales ventajas presentes en este método se encuentran:

- Permite analizar geometrías complejas
- Permite analizar cargas complejas como cargas, presión, temperatura, elementos de estructuras fluidas

Por otra parte, las desventajas de este método se encuentran:

- Requiere la experiencia del usuario
- Los resultados son aproximados, además dependen del número y tipo de elemento

El análisis por medio de elementos finitos, se lleva a cabo de forma similar para una dimensión como para dos dimensiones. Sin embargo, su complejidad aumenta, debido a la dificultad presentes en la integración propia del enfoque. Por lo tanto, es a diferencia de análisis unidireccional, que usa el método de integración por partes, el dos dimensiones se realiza el análisis, por medio del teorema de divergencia de Gauss[53].

Para el análisis de forma bidimensional, el análisis se puede determinar por medio de diferentes tipos de divisiones, entre las geometrías más importantes se encuentran, las triangulares y rectangulares. Sin embargo, los de tipo rectangular son de uso más limitado, por lo tanto, su uso se limita a geometrías solamente de este tipo[51].

2.5. ANTECEDENTES

Mondal, M. et al. (2019), fabricaron tres tipos diferentes de ladrillos, donde los aditivos utilizados fueron policarbonatos, poliestirenos y plásticos mixtos. Las mezclas contenían porcentajes variables de arena entre arcilla de 60-70% de peso y de plástico entre el 0-10% de peso, mientras los valores de cemento y cenizas se mantuvieron constantes. Se encontró que los ladrillos con estos aditivos, tuvieron una conductividad térmica muy baja, alta resistencia a la compresión y densidad significativamente menor. Además se pudo determinar que la resistencia térmica ofrecida por estos ladrillos, es mayor a medida que el contenido de plástico también lo es. Según los investigadores esta característica representa un nuevo valor agregado a la producción de ladrillos y motivar acciones logísticas para la fabricación con este tipo de residuos[54].

Khan, I. et al. (2016), realizaron pruebas para verificar el comportamiento de residuos plásticos compuestos de polietileno de baja y alta densidad (LDPE y HDPE respectivamente) y goma de miga (caucho desmenuzado), como aditivos con 2, 4, 8 y 10% en peso de betún base (PG 64-10), para la fabricación de asfalto. Por medio de mediciones con un reómetro dinámico de cizallamiento, se analizaron el comportamiento del aglutinante, en relación a la formación de grietas generadas por fatiga del asfalto, con la comparación de diferentes temperaturas contra el módulo de complejo de corte y el ángulo de fase. Donde los resultados demostraron una gran mejoría en el comportamiento reológico del aglutinante, lo que mejoró el comportamiento elástico del material, y por lo tanto su vida útil. sin embargo la adición de 10% de LDPE, demostró que representa el mejor rendimiento sobre los demás aditivos a cualquier temperatura [55].

Animpong, M. et al. (2017), utilizaron el LDPE, para fabricar un nuevo material mezclado con madera particulada, con aceite de motor como agente de acople, con porcentajes en peso de 54%, 36% y 10% respectivamente. Este material iba a ser utilizado para el soporte de paneles, lo cual implicaba exposición a la intemperie. Se derritió el material junto con el aceite a 150° y posteriormente a la misma temperatura se agregó la madera. Seguidamente la mezcla fue extruida. Finalmente se realizaron estudio de microscopia, porosidad, resistencia a la flexión, densidad y propiedades térmicas. Los resultados obtenidos, mostraron una reducción de porosidad con respecto al material sin el aceite, mejor resistencia a la flexión, menor absorción de agua y una reducción de la gravedad específica con respecto a la madera no porosa [56].

Chen W, Wong K-L. (2006), estudiaron la transferencia de calor en tanques cilíndricos con aislamiento, por medio de métodos numéricos y computacionales. Los métodos analíticos aplicados fueron: el de resistencia térmica de cuña plana, resistencia térmica cilíndrica plana y resistencia térmica de la placa plana, además del método de resistencia térmica de la cuña superior del polígono regular, adaptado a modelos cilíndricos. Los autores propusieron un nuevo método, el cual es una combinación del método convencional, con el de resistencia térmica de la cuña superior del polígono regular, para una mejor aproximación. De esta forma, para los diferentes modelos térmicos aplicados, podían ser determinadas las

tasas de transferencia de calor por medio de cada geometría y posteriormente ser predichas las temperaturas de las superficies. Por último, se realizó la solución de la ecuación diferencial en estado estable, para coordenadas cartesianas, con la convección del exterior como condición de frontera. Los resultados obtenidos mostraron la mayor aproximación del método propuesto, a diferencia del método convencional para relaciones de radio y altura menores a 10, sin embargo para relaciones de radio y altura mayores a 10 y menores a 16, el modelo de cuña superior del polígono regular, presentó mejor aproximación. Finalmente para relaciones de radio y altura mayores a 16 el método de resistencia térmica cilíndrica plana presentó mejor aproximación. [57]

Nowak-Oclon M, Oclon. P. (2019), realizaron un estudio térmico y económico, para la selección de tres tipos de tuberías aisladas para un sistema de calefacción. Se analizaron diferentes tipos de aislantes y diámetros. Los casos trabajados fueron 5, donde tres tipos son tubería sencilla con diferentes tipos de aislante y dos de doble tubería interna. Fueron determinadas las pérdidas de calor, mediante los niveles de temperatura y resistencias térmicas, a partir de las dimensiones. Una vez planteado el modelo de las pérdidas de calor para cada caso, se determinó mediante el método del valor actual neto, los costos futuros y su viabilidad, a partir de costos actuales de los insumos. Finalmente los resultados obtenidos, mostraron que el sistema de tubería doble es el que presenta menor pérdidas, a pesar de su alto costo. En cambio, el aislamiento de tipo PUR mostraron mayores pérdidas energéticas.[58]

Rezvani Rad M, McDonald A. (2019), analizaron el proceso de calentamiento y fusión del hielo sólido, dentro de una tubería donde se desarrollaron experimentos y modelos matemáticos. Se utilizó un tubo de cedula 40 de 2 pulgadas de diámetro, el cual estaba cubierto de un calentamiento resistivo aplicado en frío y con llama, dicho revestimiento, al aplicarse una corriente eléctrica, se generaba calentamiento por medio del efecto Joule. El modelo matemático desarrollado, fue de tipo unidireccional en coordenadas cilíndricas en estado transitorio. Se experimentaron potencias de 10 W 20 W y 40 W, donde las diferencias relativas obtenidas entre el modelo matemático y el experimental fueron del 16% 12% y 15%. Además los resultados obtenidos de la aproximación cuasi-estable se podían utilizar en el proceso de fusión, para potencias baja, por otra parte se determinó que no era necesaria la inclusión de un función de la potencia de entrada dependiente del tiempo y el radio. Finalmente, este tipo de modelos pueden dar una estimación muy aproximada a los valores experimentales. [59]

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento térmico del aislamiento para un dispositivo de extrusión de ariete a baja escala, para el reciclaje de bolsas plásticas

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un modelo analítico, para la transferencia de calor en estado estable del cilindro de fundición del dispositivo.
- Seleccionar los posibles materiales aislantes, mediante la metodología de Ashby con el uso del software Granta EduPack.
- Modelar el proceso de transferencia de calor del dispositivo, con ayuda del método de elementos finitos en ANSYS.
- Comparar los resultados obtenidos de manera analítica y computacional, para la comprobación de la capacidad de aproximación del método de elementos finitos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. DETERMINACIÓN DE MODELO ANALÍTICO PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR

4.1.1. Parámetros dimensionales y condiciones de frontera

En la Figura 15, se muestra el esquema isométrico, donde se especifican las dimensiones correspondientes del dispositivo. A su vez en la Tabla 4, se muestran los valores de cada dimensión y sus unidades. El espesor de la resistencia eléctrica es de 4mm, por lo tanto se tuvo en cuenta, para establecer el diámetro interno de la configuración del aislamiento. Para el espesor de la lana de vidrio e_{lv} , se tuvo en cuenta el menor espesor comercial disponible. El espesor de las láminas de acero inoxidable corresponden a el espesor de lámina comercial calibre 16.

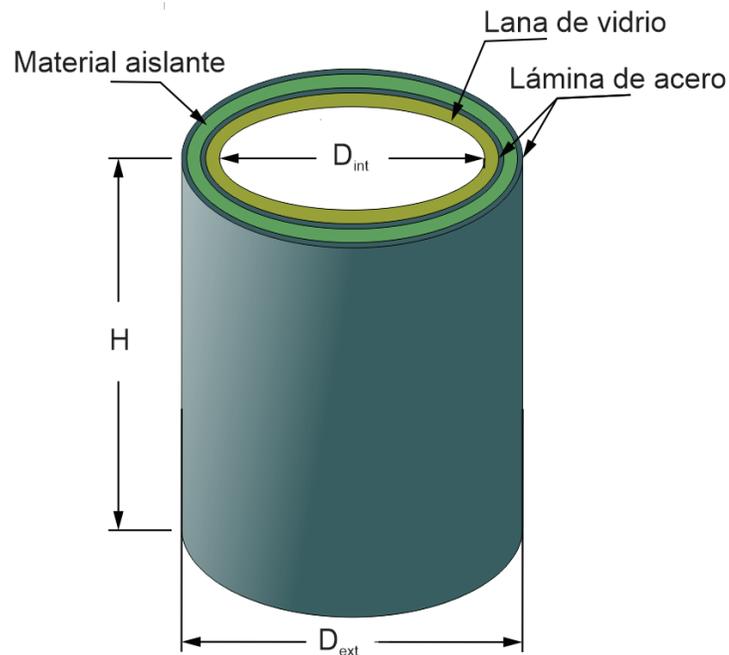


Figura 15: Esquema del dispositivo para la simulación

Fuente: Autor

Tabla 4: Dimensiones del CAD para la simulación

Dimensión	Valor	Unidad
D_{int}	91.175	mm
D_{ext}	Por determinar	mm
H	120	mm
e_{lv}	20	mm
e_l	1.1587	mm
e_m	Por determinar	mm

La Figura 16 muestra el modelo realizado que representa la configuración de los materiales utilizada para la simulación. Se utilizaron dos capas de material aislante, donde una de ellas es la lana de vidrio y la otra el material aislante a seleccionar.

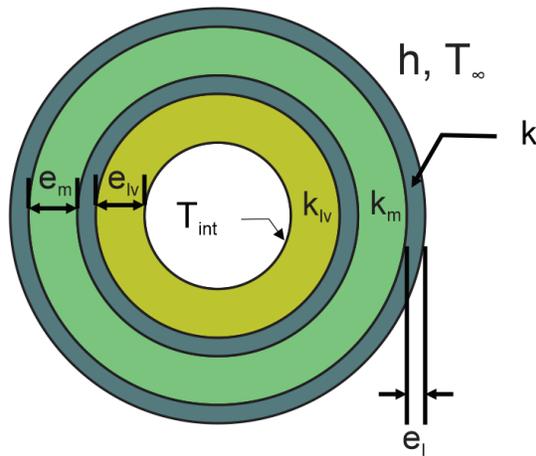


Figura 16: Esquema de las propiedades térmicas y condiciones de frontera del dispositivo

Fuente: Autor

De igual forma en la Tabla 5 se especifican las propiedades térmicas de cada material y sus unidades, para cada capa de material presente en el dispositivo. También son definidas las condiciones de frontera, que se tuvieron en cuenta para la solución del proceso de transferencia de calor al exterior.

Tabla 5: Propiedades térmicas de los materiales para la simulación

Propiedad	Valor	Unidad
Q_{in}	850	W
k_{lv}	0.040	W/m °C
k_l	14.7	W/m °C
k_m	Por determinar	W/m °C
h	15	W/m ² °C
T_{amb}	15°	°C
T_{int}	220	°C

La potencia entregada por la fuente Q_{in} es su valor máximo posible, sin embargo este valor puede ser modificado a través de una caja de control, la cual permite la variación del voltaje del dispositivo, obteniéndose un valor determinado de potencia. Los valores de k_{lv}, k_l, k_m corresponden a la conductividad térmica de la lana de vidrio, la lámina de acero inoxidable y el material aislante respectivamente. El coeficiente de convección combinado h corresponde al menor valor obtenido de forma experimental en calentadores, para el caso de convección natural, cuyo valor promedio es de $15 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ [60]. La temperatura ambiente es T_{amb} y T_{int} corresponde al valor máximo de temperatura de procesamiento del LDPE[61], [62].

4.1.2. Definición del modelo analítico a partir de la ecuación de calor

Para establecer el modelo matemático que rige el comportamiento de la temperatura del dispositivo, se partió de la ecuación diferencial de conducción de calor para coordenadas cilíndricas (ver ecuación (7)). Debido a que el análisis fue llevado a cabo en estado estacionario, se descartó la variación temporal de la temperatura, además al ser realizado el análisis en una sola dirección (radial), las demás componentes no fueron tenidas en cuenta para el análisis. Por ultimo al no existir generación de calor, su término correspondiente fue descartado, llegándose a la ecuación (23).

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (23)$$

A partir de la ecuación (23), se obtuvieron las ecuaciones que describieran el comportamiento de la temperatura, para un determinado radio. Debido a la presencia de 4 materiales, se determinó por separado la ecuación de temperatura, donde los dos materiales aislante se analizaron con conductividad térmica constante e isotrópica, en cambio para las láminas de acero inoxidable, se analizaron con conductividad térmica variable en función de la temperatura.

En la Tabla 6 se muestran los valores de cada uno de los radios, que determinan las interfaces de los materiales del dispositivo. Donde r_1 equivale a $D_{int}/2$ que es donde se encuentra la fuente calor y la primera condición de frontera. El radio r_2 , es la ubicación de la interfaz entre el primer material aislante (lana de vidrio) y la primera lámina de acero. El radio r_3 , es la ubicación de la interfaz entre la primera lámina de acero y el material aislante a seleccionar. El radio r_4 , es la ubicación de la interfaz entre el material aislante a seleccionar y la segunda lámina de acero. Finalmente el radio r_5 , corresponde al radio exterior que equivale a $D_{ext}/2$, que es la superficie del dispositivo donde se pretendía reducir la temperatura.

Tabla 6: Coordenadas de interfaces entre cada material

Coordenada	Valor (mm)
r_1	45.5875
r_2	65.5875
r_3	67.175
r_4	72.175
r_5	73.7625

- **Ecuación de temperatura para el primer material aislante**

Para el primer material aislante, correspondiente a la espuma de vidrio, cuyo espesor se mantuvo constante, se partió de la ecuación (23), al tratarse de una conductividad térmica constante, dicho valor fue eliminado de la parte interna de la derivada con respecto al radio, por lo que reescribiendo, se tiene la ecuación (24).

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (24)$$

Al observar la parte interna de la derivada en la ecuación (24), esta debe ser igual a una constante arbitraria, para que se cumpla la condición dada por la ecuación diferencial (derivada igual a cero). Por lo tanto al igualar la parte interna a una constante C_1 se obtiene la ecuación (25)

$$r \frac{dT}{dr} = C_1 \quad \text{o} \quad \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (25)$$

Al realizar separación de variables y una integración indefinida a la ecuación (25) se obtiene la ecuación para la temperatura en coordenadas cilíndricas para un radio r del primer material aislante (ver ecuación (26)).

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 ; \text{para } r_1 \leq r \leq r_2 \quad (26)$$

Donde T representa el valor de temperatura en grados centígrados y r el radio en metros, C_1 la primera constante arbitraria y C_2 la segunda constante arbitraria que surge al realizar la integración de la ecuación (25).

De esta forma se estableció la ecuación para el primer material (ver ecuación (26)), la cual está definida únicamente para el primer material aislante, desde un r_1 , donde se encuentra una de las condiciones de frontera $T(r_1) = 220^\circ$, hasta un r_2 donde se encuentra el siguiente material correspondiente a la primera lámina de acero inoxidable.

- **Ecuación de temperatura para la primera lámina de acero inoxidable.**

Como se mencionó anteriormente, para este material la conductividad térmica tomada fue variable con la temperatura, por lo tanto era necesario obtener un modelo que describiera el comportamiento de esa conductividad. En la ficha técnica del material obtenida en el software Granta EduPack, fueron extraídos los datos de forma tabular, para después realizar un ajuste por mínimos cuadrados, donde la función lineal obtenida fue la ecuación (27).

$$k(T) = 0.014595T + 14.9 \quad (27)$$

Una vez obtenida la ecuación de variación de la conductividad ecuación (27) se partió de nuevo de la ecuación (23), con la diferencia de que para este caso no se descartó la conductividad térmica, ya que ésta varía con temperatura, por lo tanto la parte interna de la derivada de la ecuación (23) se mantiene. Entonces la primera derivada para la ecuación de la temperatura, introduciendo una constante arbitraria para este nuevo material C_3 , se expresa en la ecuación (28).

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_3}{k(T) * r} \quad (28)$$

Al introducir la ecuación de conductividad y realizar una separación de variables en la ecuación (28) se obtiene una ecuación diferencial, la cual con el fin de reducir el número de constantes arbitrarias, los límites de su integración fueron definidos en la ecuación (29)

$$\int_{T(r_2)}^{T(r)} 0.014595T + 14.9 dT = \int_{r_2}^r \frac{C_3 dr}{r} \quad (29)$$

Donde $T(r_2)$ representa el valor de la temperatura justo donde inicia este material, es decir para el radio r_2 , cuya coordenada la comparte con el primer material aislante.

Al realizar la integración de la ecuación (29), se obtiene la ecuación que describe la temperatura para la lámina de acero inoxidable (ver la ecuación (30)), el valor de radio para este material está definido como $r_2 \leq r \leq r_3$. Donde para la coordenada r_2 es la interface donde comienza la lámina de acero, y r_3 donde termina la lámina es decir, la coordenada que comparte con el segundo material aislante.

$$\frac{0.014595}{2} [T(r)^2 - T(r_2)^2] + 14.9[T(r) - T(r_2)] = C_3 \ln(r/r_2) \quad (30)$$

De esta forma se obtuvo la ecuación de temperatura para la primera lámina, que corresponde a una ecuación cuadrática (ver la ecuación (30)), donde una de sus dos

soluciones para $T(r)$ corresponde al valor requerido de la temperatura para un radio r definido.

- **Ecuación de temperatura para el segundo material aislante.**

Al igual que para el primer material aislante, se llevó a cabo el mismo proceso para la obtención de la ecuación temperatura en función del radio. Para este material es necesario definir dos nuevas constantes, las cuales se definen en el proceso de integración a partir de la ecuación (24). Por lo tanto para este material se obtiene la primera derivada (ver ecuación (31)):

$$r \frac{dT}{dr} = C_4 \text{ o } \frac{dT}{dr} = \frac{C_4}{r} \quad (31)$$

Al realizar la integración de la ecuación (31), se obtiene la ecuación de la temperatura en función del radio para el segundo material aislante (ver ecuación (32)):

$$T(r) = C_4 \ln(r) + C_5 ; \text{ para } r_3 \leq r \leq r_4 \quad (32)$$

Donde $T(r)$ representa el valor de temperatura en grados centígrados y r el radio en metros, C_4 la primera constante arbitraria y C_5 la segunda constante arbitraria, que surge al realizar la integración de la ecuación (31). La coordenada r_3 , corresponde al punto donde comienza el segundo material aislante, es decir es el punto de interface con la primera lámina, por su parte la coordenada r_4 , corresponde al punto donde éste material finaliza, es decir la coordenada que comparte con la segunda lámina.

- **Ecuación de temperatura para la segunda lámina de acero.**

De igual forma para la primera lámina de acero inoxidable, al tratarse del mismo material la ecuación definida para la primera derivada de la segunda lámina es similar a la ecuación (28), definiéndose una nueva constante arbitraria C_6 para ésta lámina, donde se obtiene la ecuación (33).

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_6}{k(T) * r} \quad (33)$$

De la misma forma que en la ecuación (29), para realizar la integración, los límites que la definen están dados a partir de $T(r_4)$, que es donde inicia la segunda lámina con su correspondiente coordenada r_4 . La forma integral de la ecuación se define por la ecuación (34).

$$\int_{T(r_4)}^{T(r)} 0.014595T + 14.9 dT = \int_{r_4}^r \frac{C_6 dr}{r} \quad (34)$$

Al realizar la integración de la ecuación (34), la ecuación de la temperatura para la segunda lámina se obtiene para la ecuación (35).

$$\frac{0.014595}{2} [T(r)^2 - T(r_4)^2] + 14.9[T(r) - T(r_4)] = C_6 \ln(r/r_4) \quad (35)$$

Así con la ecuación (35), se describe el valor de la temperatura $T(r)$ para un r definido, la cual se define para un radio de la forma $r_4 \leq r \leq r_5$, donde r_5 se define como la coordenada exterior del dispositivo, donde se encuentra una convección como la condición de frontera.

- **Aplicaciones de condiciones de frontera y cálculo de constantes arbitrarias**

La primera condición de frontera definida para las ecuaciones, corresponde al valor de la temperatura de procesamiento del LDPE cuyo valor es de 220° C. La segunda condiciones corresponde a una convección en la parte externa del dispositivo con una temperatura de 15°C y un coeficiente de transferencia de calor de 15 W/m² °C.

La condición de temperatura en la parte interna, corresponde a la ecuación de temperatura del primer material aislante (ver ecuación (26)), por lo tanto es una condición aplicable únicamente a dicha ecuación, en la coordenada $r = r_1$. Aplicando esta condición se obtiene la primera ecuación del sistema (ecuación (36)).

$$C_1 \ln(r_1) + C_2 = 220 \quad (36)$$

De esta forma se obtiene la primera ecuación del sistema (ver ecuación (36)) que permite la obtención de valores de las constantes arbitrarias para cada material.

Para la aplicación de las condición de frontera de convección en la parte externa ($r = r_5$), se realizó un balance de energía para incluir los valores correspondiente de ésta condición, al no tener un valor de temperatura en dicha coordenada. Al realizar un balance de energía se obtuvo a partir de la ecuación (1) y la ecuación (2), una relación entre la convección y la conducción (ver ecuación (37))

$$-k(T) \frac{dT}{dr} = h[T(r_5) - T_\infty] \quad (37)$$

La ecuación (37) establece una relación entre la temperatura exterior, el coeficiente de convección y la temperatura del ambiente, el cual es aplicado igualando el calor que sale de la segunda lámina y el disipado por el ambiente.

Al realizar una sustitución de la ecuación (33) evaluada en $r = r_5$, en la ecuación (37) se obtiene la ecuación (38)

$$-k(T) \frac{C_6}{k(T) * r_5} = h[T(r_5) - T_\infty] \quad (38)$$

Por lo tanto al simplificar términos semejantes y realizar el despeje para $T(r_5)$ en la ecuación (38) se obtiene la ecuación (39)

$$T(r_5) = T_\infty - \frac{C_6}{hr_5} \quad (39)$$

La ecuación (39) permite relacionar la convección del ambiente (coeficiente de convección h y la temperatura del ambiente T_∞), con el valor de temperatura exterior $T(r_5)$, para de esta forma, relacionarlos con las ecuaciones de temperatura obtenidas anteriormente, en términos conocidos donde las únicas incógnitas son las constantes arbitrarias.

Debido a la no existencia de condiciones de frontera definidas para cada material, aparte de las mencionadas anteriormente, para poder definir las demás ecuaciones del sistema solamente en términos conocidos, fue necesario utilizar como condiciones de frontera para cada material, las mismas ecuaciones evaluadas en los respectivos radios donde se encontraban las interfaces, de forma progresiva. Las ecuaciones de temperatura para las dos láminas fueron fijadas debido a su complejidad, para introducir en ellas como condiciones de frontera, las ecuaciones de temperatura para los materiales aislantes evaluadas en cada radio.

Como se muestra en la ecuación (30), son necesarias las dos condiciones de frontera correspondientes a $T(r_2), T(r_3)$ para r_2 y r_3 respectivamente. Dichas condiciones fueron definidas a partir de las ecuaciones de temperatura para el primer y segundo material aislante evaluadas en r_2 y r_3 respectivamente. A realizar las evaluaciones de la ecuación (26) en r_2 y la ecuación (32) en r_3 se obtienen las ecuaciones (40) y (41).

$$T(r_2) = C_1 \ln(r_2) + C_2 \quad (40)$$

$$T(r_3) = C_4 \ln(r_3) + C_5 \quad (41)$$

Para poder incluir las anteriores condiciones de frontera, la ecuación (30), al ya contener la condición $T(r_2)$ para r_2 de forma implícita, era necesario evaluar para r_3 con el fin de establecer la condición de temperatura $T(r_3)$. Al realizar la evaluación se obtiene la ecuación (42).

$$\frac{0.014595}{2} [T(r_3)^2 - T(r_2)^2] + 14.9[T(r_3) - T(r_2)] = C_3 \ln(r_3/r_2) \quad (42)$$

Al haberse establecido la ecuación de temperatura evaluada para el radio r_3 , es posible sustituir las ecuaciones (40) y (41), en la ecuación (42). Para de esta forma obtener la ecuación (43) para el sistema a solucionar en función de términos conocidos.

$$\frac{0.014595}{2} [(C_4 \ln(r_3) + C_5)^2 - (C_1 \ln(r_2) + C_2)^2] + 14.9[(C_4 \ln(r_3) + C_5) - (C_1 \ln(r_2) + C_2)] = C_3 \ln(r_3/r_2) \quad (43)$$

La ecuación (43), permitió obtener una relación entre todas las constantes arbitrarias, presentes en las ecuaciones para todos los materiales. Sin embargo, debido al número de incógnitas, el número de ecuaciones necesarias era mayor. Por lo tanto era necesario utilizar la ecuación de temperatura para el segundo material aislante, junto con la condición de convección presente en la parte externa.

De forma similar para obtener la ecuación (43), se procedió con la ecuación (32) pero esta vez evaluada para el radio $r = r_4$. La cual quedó definida en la ecuación (44)

$$T(r_4) = C_4 \ln(r_4) + C_5 \quad (44)$$

Como segunda condición de frontera, está definida la ecuación (39), por lo tanto es necesario evaluar la ecuación (35), para el radio $r = r_5$ y obtener una ecuación (45).

$$\frac{0.014595}{2} [T(r_5)^2 - T(r_4)^2] + 14.9[T(r_5) - T(r_4)] = C_6 \ln(r_5/r_4) \quad (45)$$

Con la ecuación (45) definida, es posible hacer la sustitución de las dos condiciones de frontera tratadas anteriormente (ecuación (39) y ecuación (44)), por lo que se obtiene la ecuación (46).

$$\frac{0.014595}{2} \left[\left(T_\infty - \frac{C_6}{hr_5} \right)^2 - (C_4 \ln(r_4) + C_5)^2 \right] + 14.9 \left[\left(T_\infty - \frac{C_6}{hr_5} \right) - (C_4 \ln(r_4) + C_5) \right] = C_6 \ln(r_5/r_4) \quad (46)$$

Por medio de la ecuación (46), se pudo obtener una segunda relación de las constantes arbitrarias, junto con los parámetros correspondientes a la convección del ambiente. No obstante, solo fueron obtenidas tres ecuaciones donde el número de incógnitas presentes es

de seis (6), por lo que eran necesarias tres ecuaciones más que pudieran relacionar las incógnitas presentes.

Finalmente para hallar las tres ecuaciones faltantes que relacionaran las constante, se realizaron tres balances de energía, con el calor de conducción presente en las tres interfaces de los materiales, las cuales estaban presentes entre el primer material aislante y la primera lámina, entre la primera lámina y el segundo material aislante y finalmente entre el segundo material aislante y la segunda lámina. Los balances fueron establecidos por las ecuaciones (47), (48) y (49).

$$-k_{lv} \frac{dT}{dr_2} = -k_l(T) \frac{dT}{dr_2} \quad (47)$$

$$-k_l(T) \frac{dT}{dr_3} = -k_m \frac{dT}{dr_3} \quad (48)$$

$$-k_m \frac{dT}{dr_4} = -k_l(T) \frac{dT}{dr_4} \quad (49)$$

Para las ecuaciones obtenidas mediante el balance de energía, el factor de la derivada es posible sustituirlo, por las ecuaciones obtenidas anteriormente para las ecuaciones de temperatura de cada material, donde se encuentran incluidas las constantes.

Al tomar la Ecuación (47) y sustituir la ecuación (25), para la parte izquierda que corresponde al primer material. De igual forma se realiza la sustitución de la ecuación (28) para la parte derecha correspondiente a la primera lámina, ambas evaluadas para el radio r_2 . Así se obtiene la relación para las constantes arbitrarias establecida en la ecuación (50).

$$-k_{lv} \frac{C_1}{r_2} = -k_l(T) \frac{C_3}{k_l(T) * r_2} \quad (50)$$

Al realizar las sustituciones y simplificar términos semejantes la relación obtenida para las constantes C_1 , C_3 finalmente se expresa como la ecuación (51).

$$C_1 = \frac{C_3}{k_{lv}} \quad (51)$$

Realizando el mismo procedimiento para la ecuación (48) y (49) evaluadas en sus respectivos radios, las relaciones para las constantes obtenidas fueron las ecuaciones (52) y (53).

$$C_3 = C_5 k_m \quad (52)$$

$$C_7 = C_5 k_m \quad (53)$$

Al definir las seis ecuaciones con seis incógnitas es posible establecer el sistema de ecuaciones que permite por medio de su solución determinar las constantes arbitrarias para las ecuaciones de temperatura de cada material. Dicho sistema se define a partir de las siguientes ecuaciones (54), (55), (56), (57), (58), (59).

$$C_1 \ln(r_1) + C_2 = 220 \quad (54)$$

$$\frac{0.014595}{2} [(C_4 \ln(r_3) + C_5)^2 - (C_1 \ln(r_2) + C_2)^2] + 14.9 [(C_4 \ln(r_3) + C_5) - (C_1 \ln(r_2) + C_2)] = C_3 \ln(r_3/r_2) \quad (55)$$

$$\frac{0.014595}{2} \left[\left(T_\infty - \frac{C_6}{hr_5} \right)^2 - (C_4 \ln(r_4) + C_5)^2 \right] + 14.9 \left[\left(T_\infty - \frac{C_6}{hr_5} \right) - (C_4 \ln(r_4) + C_5) \right] = C_6 \ln(r_5/r_4) \quad (56)$$

$$C_1 = \frac{C_3}{k_{lv}} \quad (57)$$

$$C_3 = C_5 k_m \quad (58)$$

$$C_7 = C_5 k_m \quad (59)$$

La solución del sistema anterior, permite la obtención de las ecuaciones de temperatura para cada material, basado en los valores de radio y conductividad respectivos. Debido a la complejidad presente en el sistema para una solución analítica, fue llevada a cabo la solución por medio de prueba y error, con la prueba de valores de las constantes hasta satisfacer las ecuaciones anteriormente definidas.

4.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES MEDIANTE EL SOFTWARE GRANTA EDUPACK

En la Tabla 7 se muestran las variables tenidas en cuenta para la selección de los materiales del aislamiento, donde se definieron un total de 4. Donde la función principal se basa en la baja conductividad térmica, debido a que el proceso de fundición requiere de altas temperaturas, como única restricción se definió la capacidad del material de mantener sus

propiedades estables a altas temperaturas. Como objetivos definieron el bajo costo, con el fin de garantizar la viabilidad de su construcción y una densidad baja, para permitir el fácil traslado del dispositivo.

Tabla 7: Requerimientos para selección de materiales metodología de Ashby

	Descripción	Propiedad	Parámetro
Función	Evitar pérdidas de calor al exterior	Conductividad térmica	<0.47 [W/m °C]
Restricciones	Operar a altas temperaturas	Máxima temperatura de servicio	>450 [°C]
Objetivos	Bajo costo	precio por kilogramo	<10000 [COP/Kg]
	Bajo peso (fácil traslado)	Densidad	> 2600 [kg/m ³]
Variables libres	Cualquier tipo presentación en el mercado (fibra, particulado, laminar)		

Para realizar la selección se utilizó el software Granta EduPack, por medio de la base general de materiales de ingeniería (nivel 3). En la primera fase, se estableció la gráfica comparativa de la conductividad térmica contra la temperatura máxima de servicio, para posteriormente con los materiales obtenidos realizar el análisis de densidad contra costo.

Los materiales tenidos en cuenta fueron únicamente materiales cerámicos, debido características como: baja densidad, alta porosidad, alta resistencia al choque térmico y baja conductividad térmica. Esto los hace apropiados para diferentes aplicaciones en aislamiento térmico, como los hornos y sistema de vapor sobrecalentado, donde se sobrepasan temperaturas de 325°C[63], [64].

4.2.1. Gráfica de conductividad contra temperatura máxima de servicio

El valor máximo de la conductividad térmica (ordenada), para realizar el seccionamiento fue de 0.47 W/m °C, que corresponde el valor máximo ofrecido por los materiales comúnmente utilizados en aislamientos de hornos y tuberías de transporte, entre los cuales se encuentran los cerámicos refractarios, espumas de vidrio, poliuretano, lana mineral y fibra mineral[12], [63]. La conductividad térmica mínima ofrecida por los materiales presentes en la base de datos, es de 0.019 W/m °C, por lo tanto fue el límite inferior utilizado para la gráfica.

Para la temperatura máxima de servicio (abscisa), el valor mínimo seleccionado fue de 450°C, cuyo valor corresponde al que se presenta generalmente en sistemas de aislamiento[63], [64]. El valor máximo ofrecido por la base de datos está definido como 3540°C. Los materiales presentes en la base de datos para cerámicos, junto con los límites definidos (líneas discontinuas) se muestran en la Figura 17, donde los posibles materiales se

encuentran señalados por el cuadrante de color rojo. El número inicial de materiales fue de 3095.

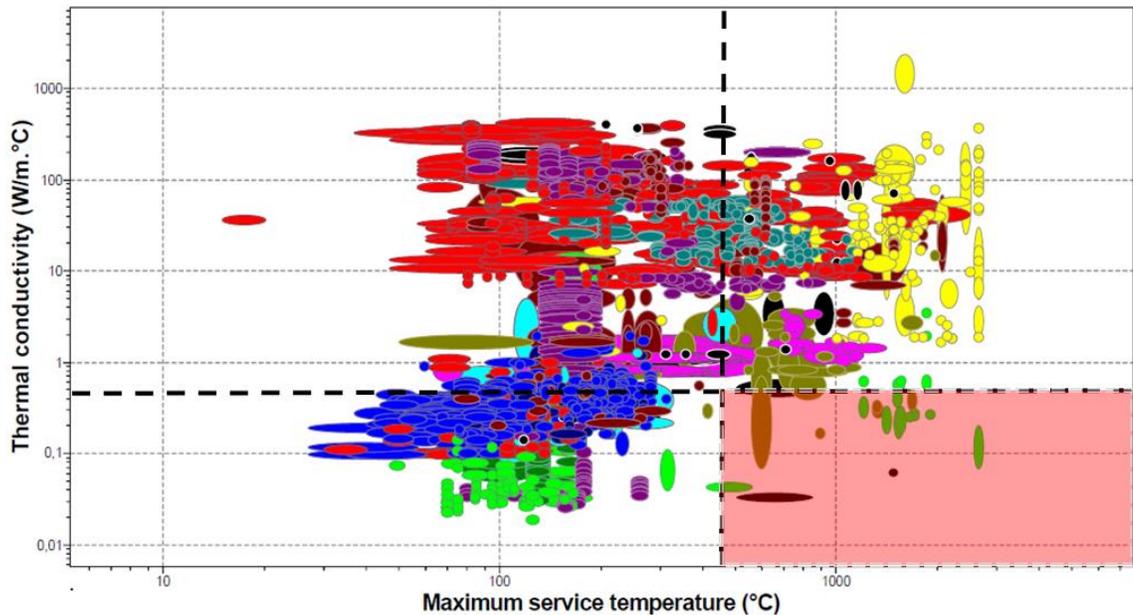


Figura 17: Conductividad térmica vs Temperatura máxima de servicio
Fuente: Autor

4.2.2. Gráfica de densidad contra precio

En la segunda fase se procedió a seleccionar los materiales que cumplieran con el criterio de precio y densidad. Para el intervalo de densidad (ordenada), se estableció como máximo 2600 Kg/m^3 , que corresponde a uno de los máximos valores de los materiales aislantes de uso convencional, por otra parte con una densidad baja el peso del material necesario y la conductividad térmica se ven reducidas[64], lo que garantiza dos de las condiciones claves presentes en el dispositivo. El valor inferior ofrecido por la base de datos corresponde a 8.85 Kg/m^3 .

Por su parte para el precio (abscisa), el valor máximo definido fue de 12000 COP/Kg , con el fin de garantizar un bajo precio por kilogramo del material. Además, junto con una baja densidad, poder evitar sobre costos para su adquisición, a pesar de que la cantidad de material requerido para la construcción del dispositivo sea grande.

Dicha limitante también permitió descartar materiales, que a pesar de una temperatura de operación alta (superior a los 1200 °C) eran de alto costo. Por lo cual, no era necesario que su temperatura de trabajo fuera muy alta, tal fue el caso de la espuma de carbono, que su temperatura máxima de trabajo se encuentra por encima de los 2000 °C y su costo es superior a los 13000 COP/Kg . La definición de los límites se muestra en la Figura 18 en línea

punteada, donde los posibles materiales se encuentran señalados por el cuadrante de color rojo.

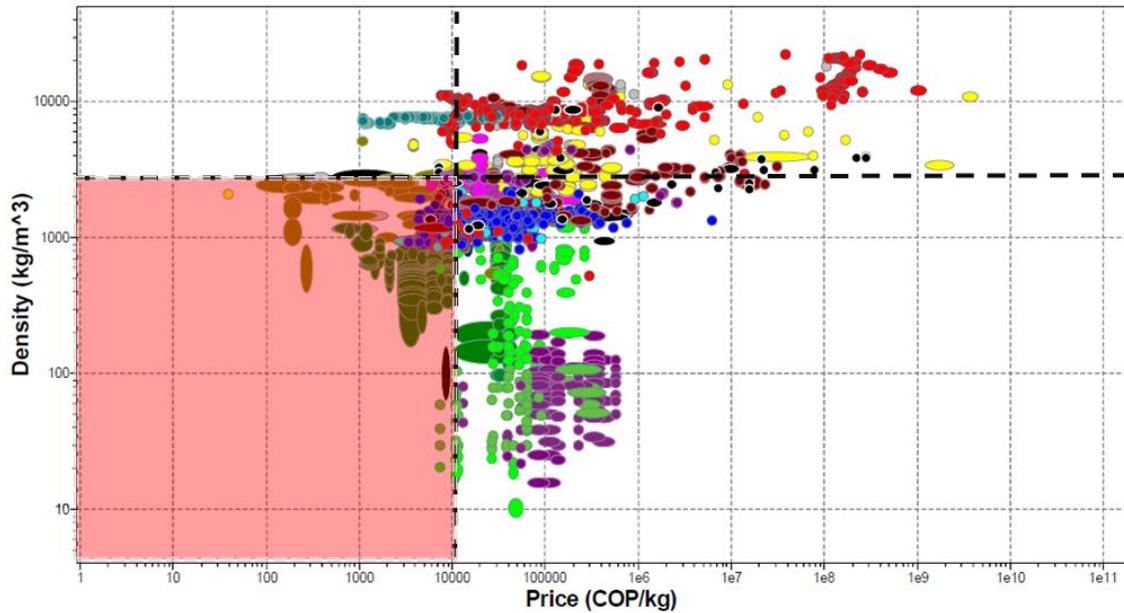


Figura 18: Densidad vs precio
Fuente: Autor

4.3. SIMULACIÓN PARAMETRIZADA PARA LA SELECCIÓN DEL MATERIAL AISLANTE

Para determinar el material que permita una temperatura exterior muy próxima a la del ambiente, se realizó un análisis, mediante una simulación por el método de elementos finitos en ANSYS, a cada uno de los posibles materiales obtenidos en la lista de la selección por metodología de Ashby. La simulación fue llevada a cabo en el módulo de Steady state, donde se realizó una parametrización del espesor para cada uno de los materiales, teniendo en cuenta su respectivo valor de conductividad térmica.

Una vez definido el espesor adecuado para cada uno de ellos, con el uso de las dimensiones del dispositivo, se calculó el volumen necesario de cada material. Posteriormente, mediante la definición de densidad, se calculó la masa para cada volumen establecido previamente. Por último, con cada valor de masa se determinó su costo, a partir del valor COP por kilogramo, el cual está definido en la base de datos.

4.3.1. CAD de la configuración de los materiales

El CAD del dispositivo fue realizado mediante la herramienta desing modeler, donde se partió de un cilindro de 80 mm de diámetro correspondiente al LDPE, en la parte externa de dicho cilindro, fue definida una capa correspondiente al acero inoxidable que contiene al LDPE, de espesor e_l . En la parte exterior de la lámina se encuentra la fuente de calor, que requiere un espacio radial de 4 mm, para en la parte exterior de la fuente, fijarse la capa de lana de vidrio con un espesor definido de 20 mm. Posteriormente, se colocó la siguiente capa de lámina de acero, que separa a la lana de vidrio con el material aislante de espesor parametrizado. Finalmente fue limitada la configuración, con una tercera lámina de acero inoxidable, que representa la parte exterior del dispositivo.

Cada uno de los materiales fue generado mediante extrusiones, las cuales se definían a través de diferentes bosquejos, con las dimensiones especificadas en la Tabla 4. Para el caso de la lana de vidrio y la segunda lámina de acero, se realizó una extrusión con el espesor hacia el interior, definida a partir de su diámetro externo. Para el caso del material aislante su espesor parametrizado, fue definido en el bosquejo como la distancia radial entre el radio externo de la primera lámina de acero y el radio interno de la tercera lamina de acero.

En la Figura 19 se muestra el CAD final desarrollado en el software para la simulación, compuesta por 4 capas de material diferente en cada una definidos por su respectiva extrusión. Donde el material cuyo espesor varía es el de color verde (material aislante parametrizado), a su vez en la lámina exterior su geometría también se ve afectada en cuanto al radio interior.

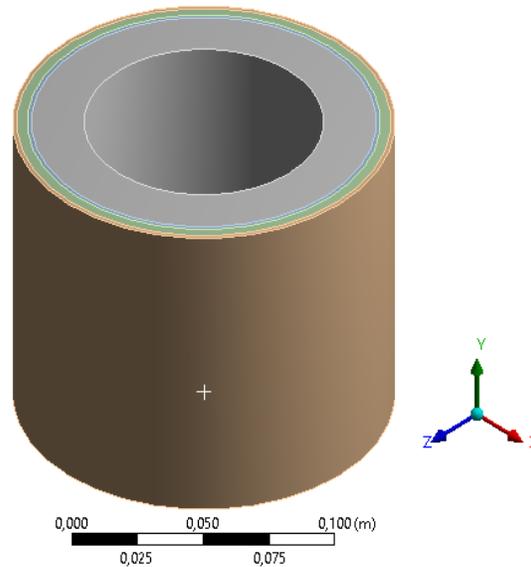


Figura 19: Modelo CAD del dispositivo
Fuente: Autor

4.3.2. Mallado de la geometría

El mallado de la configuración del dispositivo y los materiales fue realizado en dos partes, mallado multizona y mallado dimensionado. Las especificaciones básicas definidas del mallado fueron: centro del ángulo de tramo fino, transición lenta, relevancia del centro fina y suavizado alto.

Para la primera parte, el mallado multizona (Multizone) fue aplicado de forma separada para las láminas de acero inoxidable y los materiales aislantes. Se estableció un mallado enfocado en la dirección radial donde se definió el tipo de elemento a partir del estudio de sensibilidad de malla, cuya altura de cada elemento fue de 20 mm. Para la segunda parte se definió un mallado dimensionado sobre cuerpos (Body sizing), con el fin de aumentar el nivel de refinamiento de la malla, por medio de la especificación de la medida de cada elemento determinadas en el estudio de sensibilidad de malla. Para las láminas de acero inoxidable se utilizó una longitud de elemento de 1 mm y para los aislantes de 2.5 mm. Al igual que el mallado multizona, fueron aplicados dos mallados dimensionados por separado, para los materiales aislantes y las láminas de acero respectivamente. El tipo de elemento utilizado y su longitud se determinó mediante el estudio de sensibilidad del modelo.

- **Estudio sensibilidad del modelo**

Para verificar la mejor forma de discretización de la geometría en el mallado, se realizó un estudio de sensibilidad del modelo, para encontrar el tipo y tamaño óptimo del elemento para realizar el mallado de la geometría. Este proceso se llevó a cabo con la configuración estándar de los materiales, donde el material aislante a seleccionar fue sustituido por una capa de lana de vidrio, cuyo espesor se definió para 5 mm, donde en las condiciones de frontera se definieron los mismos valores especificados en la sección 4.1. Fueron analizados cuatro tipos de elementos entre los que se encuentra el WED 6 (prismático de 6 nodos), WED 15 (prismático de 15 nodos), HEX 8 (hexaédrico de 8 nodos), HEX 20 (hexaédrico de 20 nodos). Donde la principal variable para el análisis fue la temperatura exterior, las demás variables tenidas en cuenta fueron el número de nodos, el número de elementos y la diferencia de temperatura entre la parte interior y exterior. Los valores analizados para la longitud del elemento fueron de 0.5, 1, 2.5 y 5 mm. En la Figura 20 se muestra el mallado obtenido de forma isométrica y en la Figura 21 el mallado en la dirección radial, visto desde la cara superior.

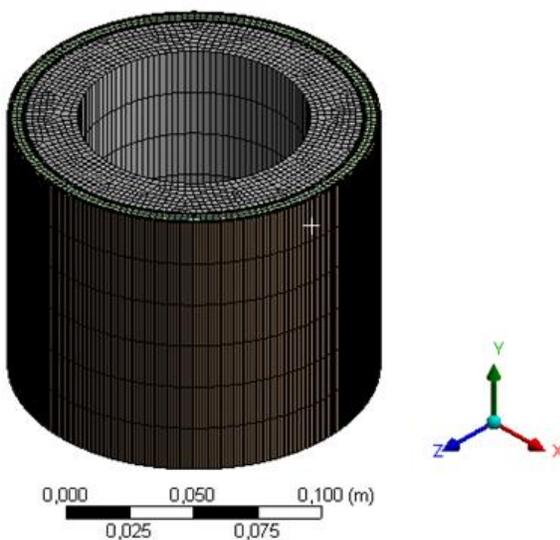


Figura 20: Mallado obtenido para la geometría del dispositivo en forma isométrica
Fuente: Autor

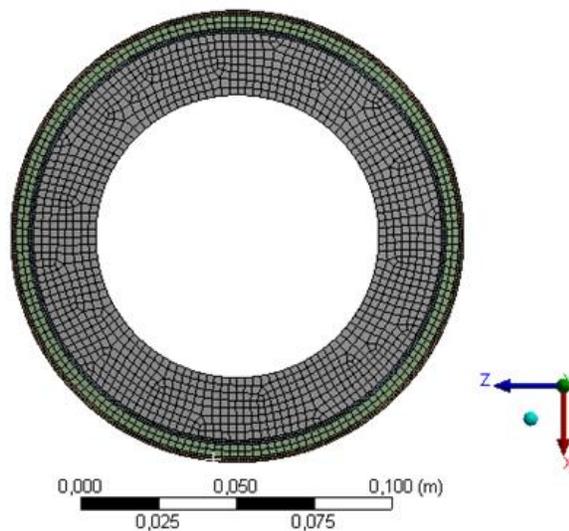


Figura 21: Mallado obtenido en forma bidimensional
Fuente: Autor

Aplicado todo el proceso de mallado, el número de nodos obtenidos fue de 31199, con un total de elementos de 19494.

4.4. SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO PARA LA FUNDICIÓN DEL LDPE

Para determinar el tiempo necesario para la fundición del LDPE, se realizó una simulación en estado transitorio, por medio de la herramienta Transient thermal en ANSYS. Las

propiedades tenidas en cuenta para la lámina de acero fueron variables con la temperatura al igual que la simulación en estado estable, en cambio para el LDPE las propiedades fueron constantes con la temperatura.

4.4.1. CAD de la configuración de los materiales

La geometría para la simulación estuvo compuesta por una lámina de acero inoxidable 304L, calibre 16 (espesor de 1.5875 mm) en forma cilíndrica al igual que en la sección anterior, donde en la parte interna fue asignado el LDPE como un cilindro macizo, cuyo diámetro fue de 80 mm. En la Figura 22 se muestra el CAD creado para realizar la simulación.

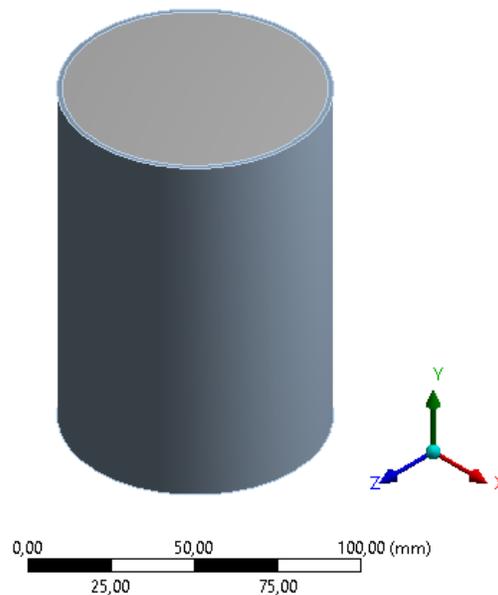


Figura 22: CAD para simulación de fundición de LDPE

4.4.2. Mallado de la geometría

El mallado para la geometría mostrada en la figura CAD, fue del mismo tipo que la simulación en estado estable, obtenido por el estudio de sensibilidad de malla. El número de nodos y elementos obtenidos fueron 10038 y 6786 respectivamente, en la Figura 23, se muestra el mallado generado. Como condiciones de frontera de la simulación fue tomada en cuenta la condición de temperatura en la parte exterior de 220°C, como segunda condición se estableció un aislamiento perfecto correspondiente a la cara superior e inferior del cilindro de LDPE, las cuales están dadas por el pistón y la matriz de extrusión del dispositivo.

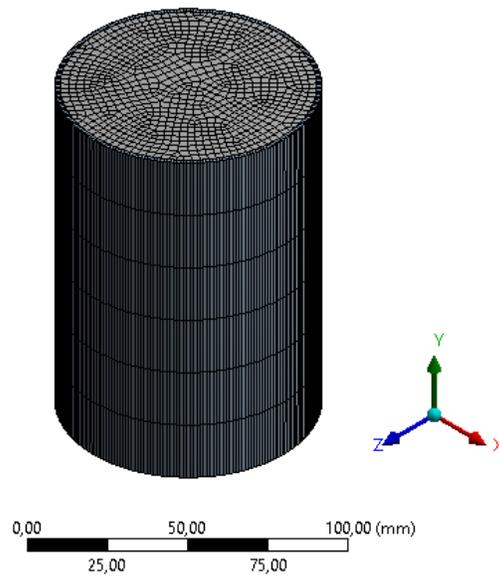


Figura 23: Mallado para simulación de fundición del LDPE

Para llevar a cabo el análisis, se partió de un tiempo de proceso de 10 minutos, realizando saltos de tiempo de 1 minuto. Progresivamente el valor de tiempo fue aumentado cada 10 minutos, hasta obtener una temperatura en la parte central del cilindro superior a los 200°C. Fueron establecidos 8 sensores de temperatura mediante la herramienta Probe, para verificar el comportamiento de la temperatura en cada uno de los puntos establecidos para el análisis. En la Tabla 8 se muestra la ubicación de los puntos donde fueron colocados los diferentes sensores.

Tabla 8: Sensores y sus coordenadas de ubicación

Sensor #	Ubicación [x,y,z] (mm)
Sensor #1	[10,60,0]
Sensor #2	[20,60,0]
Sensor #3	[30,60,0]
Sensor #4	[40,60,0]
Sensor #5	[0,0,0]
Sensor #6	0,60,0]
Sensor #7	[0,120,0]

El análisis fue llevado a cabo verificando la temperatura para los sensores #5, #6 y #7. Los cuales eran quienes por encontrarse en la parte central, eran quienes iban a tener el menos valor de temperatura debido a las condiciones establecidas.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. LISTADO DE MATERIALES OBTENIDOS POR METODOLOGÍA DE ASHBY

A partir de los filtros de selección mediante el Software Granta EduPack, para la primera gráfica de conductividad térmica contra temperatura máxima de servicio, se obtuvieron un total de 15 materiales, los cuales están representados en la Figura 24.

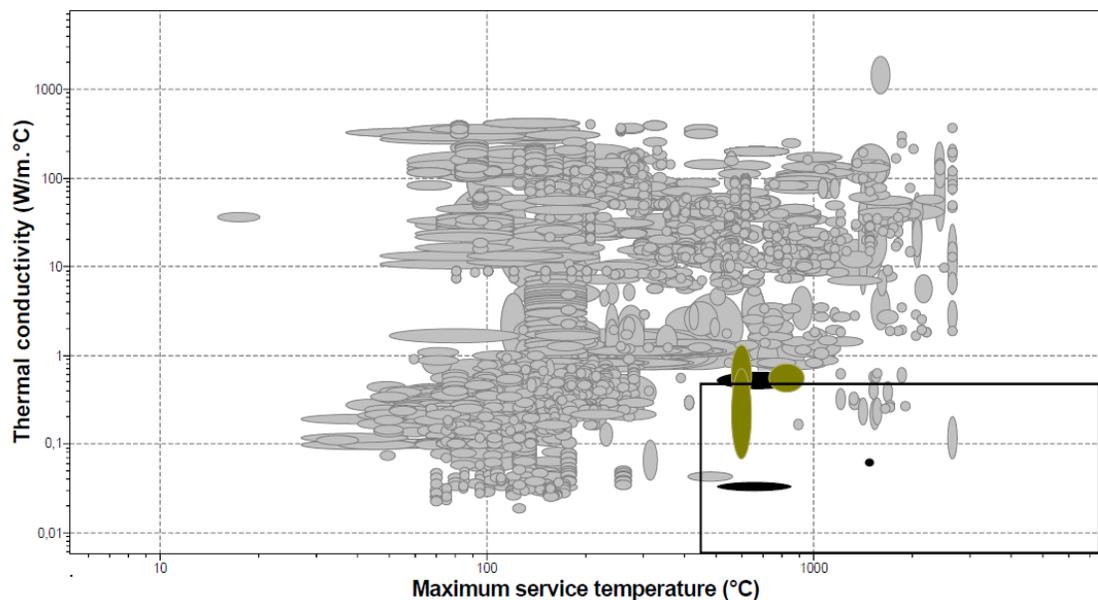


Figura 24: materiales obtenidos mediante la gráfica de conductividad vs temperatura máxima de servicio
Fuente: Autor

De igual forma haciendo el mismo procedimiento para la gráfica de densidad vs costo, los materiales obtenidos fueron 6, como se muestra en la Figura 25 (círculos a color). Entre los que se encuentran el basalto, concreto aislante y estructural, ladrillo común, mica y vermiculita.

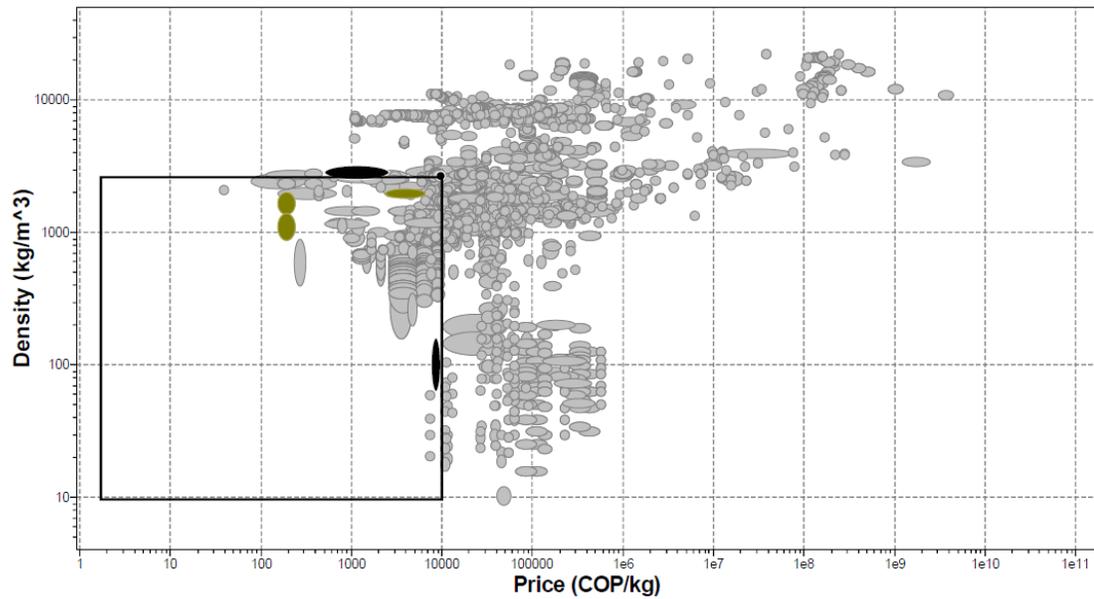


Figura 25: Materiales obtenidos mediante la gráfica de densidad vs precio
Fuente: Autor

En la Tabla 9 se muestran todos los materiales obtenidos mediante la selección de la metodología de Ashby, junto con sus respectivas propiedades necesarias, para llevar a cabo tanto la simulación como la selección del material menos costoso.

Tabla 9: Propiedades de los aislantes obtenidos

Material seleccionado	Densidad [Kg/m ³]	Conductividad [W/m °C]	Precio COP/Kg
Basalt (f)	2.695e3	0.034	9.61e3
Brick (common, hard) (2.03)	2.025e3	0.6	4.375e3
Concrete (insulating lightweight)	1.15e3	0.385	192
Concrete (structural lightweight)	1.7e3	0.8	192
Mica (p)	2.9e3	0.5425	1.5015e3
Vermiculite	112	0.06425	8.45e3

- **Basalt fiber (fibra de basalto)**

El basalto es una fibra comúnmente usada para aplicaciones de protección térmica, entre las cuales se encuentran la protección contra incendios y aislamientos de alta temperatura, también es usado como fibra de refuerzo para diferentes tipos de materiales compuestos. Comercialmente se encuentra en forma de rollos tubulares, en donde los principales espesores comercializados por la empresa ANHUI PARKER NEW MATERIAL CO, son de 1.5 y 3 mm, ésta última fue la tenida en cuenta para el análisis.

- **Brick common hard (2.03) (Ladrillo común)**

El ladrillo duro común es un material usado en aplicaciones de construcción, entre las que se encuentran muros, puentes, edificios, carreteras, etc. Debido a la fácil fabricación a partir de la arcilla común, la cual es mezclada y preparada con una forma definida, para posteriormente realizarse un cocido, puede ser adaptado fácilmente por su facilidad de moldeo a cualquier tipo de geometría. Este material puede ser adquirido en diferentes presentaciones y cantidades en cualquier Depósito de materiales o Ferretería a nivel nacional.

- **Concrete Insulating Lightweight (concreto ligero para aislamiento)**

Este tipo de concreto es especialmente usado para aplicaciones que requieren tanto protección térmica para incendios como para aislamiento acústico, entre otras aplicaciones se encuentran el aislamiento de hornos y calderas, puertas y tapas para hornos, reparaciones de revestimientos desgastados y enfriadores de hornos rotatorios. Su preparación se basa en la mezcla del material particulado (cemento aislante) con agua, donde la cantidad de esta define el nivel de moldeabilidad de la pasta obtenida, para ser adaptada al igual que la arcilla a cualquier tipo de geometría. Existen diferentes tipos de cemento según los aditivos que presente cada fabricante. A nivel nacional entre los principales fabricantes se encuentran THERMAL CERAMICS COLOMBIA S.A. y REFRA TERMIC S.A.

- **Concrete structural lightweight (concreto ligero estructural)**

Como su nombre lo indica es un tipo de concreto utilizado en aplicaciones estructurales, además de tener propiedades como la resistencia al fuego, permeabilidad y la intemperie. Debido a ser un material para la resistencia de esfuerzos a compresión como muros y columnas, requiere de una mezcla de agua grava (opcional) y arena. Sin embargo, permite una fácil moldeabilidad según la cantidad de agua agregada. Este material es comercializado a nivel nacional por CEMEX S.A. y CEMENTOS ARGOS.

- **Mica**

Entre los usos principales de la mica se encuentran los compuestos aditivos para juntas, aditivos de perforación, pinturas, techos y productos de caucho. Para su preparación, se debe realizar una mezcla con diferentes tipos de resinas orgánicas e inorgánicas o aditivos para mejorar su capacidad de moldeo, entre las que se encuentran el silicato de calcio, yeso y caolín para las altas temperaturas. A nivel nacional entre los principales fabricantes se encuentran QCA S.A.S.

- **Vermiculite (Vermiculita)**

La vermiculita generalmente es mezclada con yeso, para diferentes tipos de aplicaciones como son a reducción de ruido y mejoramiento acústico de estaciones de radio, teatros,

salones, etc. Sin embargo, entre otras aplicaciones se encuentran el aislamiento térmico de edificaciones, protección contra incendios externos e internos, revoques de yeso y aislamiento Loft. Este material permite ser mezclado con resinas y prensado para fabricar láminas aislantes adecuadas para su postura en paredes y sistemas de aislamiento, inclusive puede ser adquirido con una mezcla ya preparada con Cemento como aditivo para diferentes aplicaciones como techos, pisos y demás coberturas. A nivel nacional entre los principales fabricantes se encuentran VITCAS y ArrMaz.

5.2. SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE ELEMENTO PARA SIMULAR

En la Figura 26 se muestran los valores obtenidos al realizar el análisis de la temperatura exterior del dispositivo, para los mallados basados en los diferentes tipos de elementos utilizados (WED 6, WED 15, HEX 8, HEX 20) y el valor obtenido mediante el modelo analítico. Se pudo apreciar la alta variación del valor de temperatura, para la malla con los elementos de tipo WED 15 y HEX 20, por su parte la malla basada en los elementos de tipo WED 6 y HEX 8, presentaron una muy baja variación de la temperatura, para los diferentes tamaños de elemento, lo que se traduce como una buena estabilidad de resultados. Además, estos dos tipos de mallado (WED 6 y HEX 8), son muy acordes al valor que se obtuvo al realizar la solución del modelo analítico con las mismas condiciones que se especifican en este modelo (32.3430 °C), como no lo fue para la malla basada en WED 15 y HEX 20.

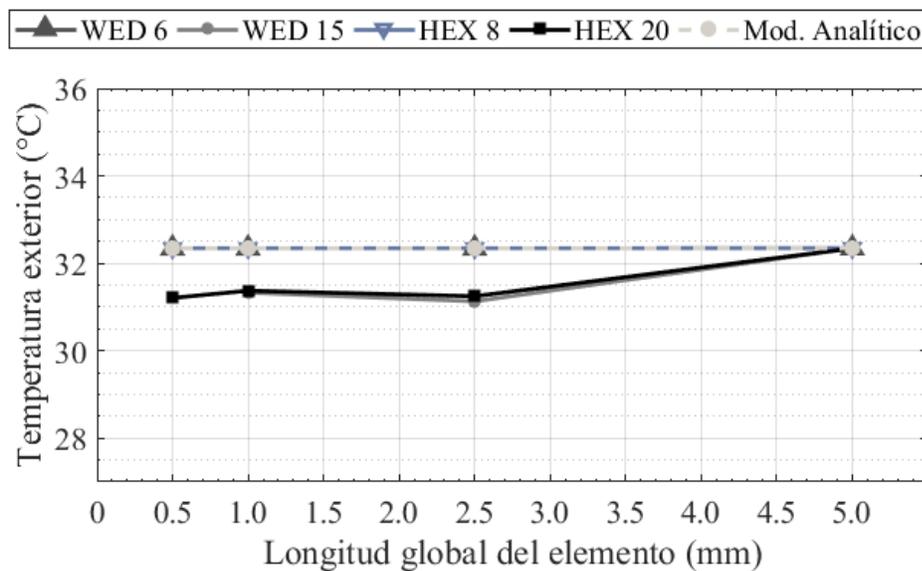


Figura 26: Variación de la temperatura para los diferentes tipos de elementos con respecto al modelo analítico
Fuente: Autor

En la fFigura 27 y la fFigura 28, se muestran los valores obtenidos al realizar el análisis para el número de nodos y elementos obtenidos al realizar el mallado con cada tipo de

elemento y su respectivo valor de longitud. Se pudo evidenciar que existe una relación inversa entre la longitud del elemento y el número de nodos y elementos a obtener, para los diferentes tipos de elementos.

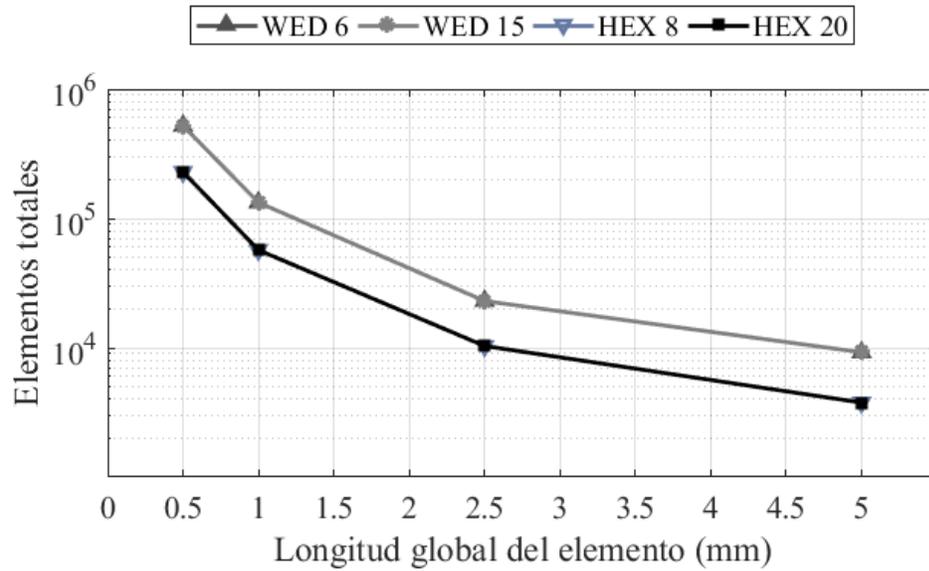


Figura 27: Variación del número de elementos para cada tipo de elemento
Fuente: Autor

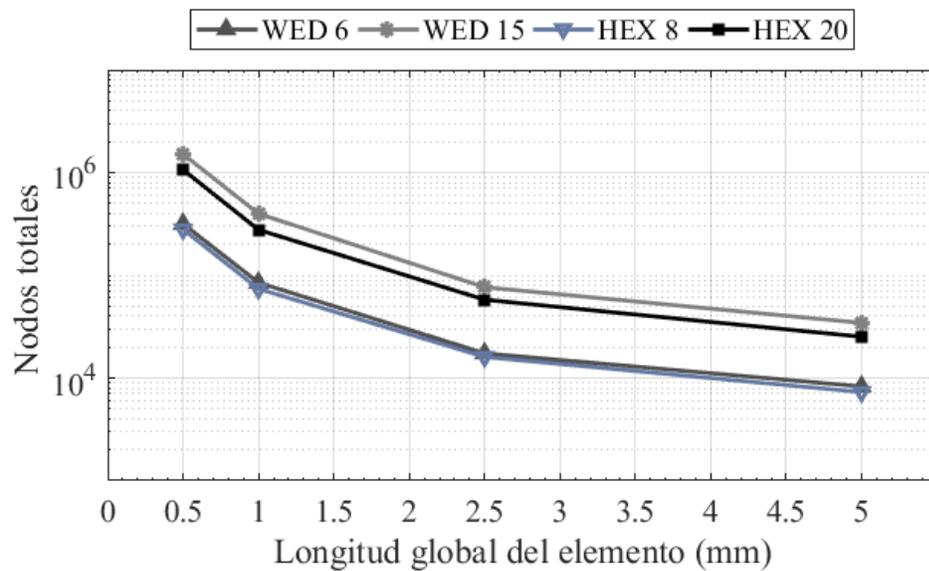


Figura 28: Variación del total de nodos según el tipo de elemento
Fuente: Autor

A pesar de que el número de elementos sea igual para los mismos tipos de elementos, ya sea hexaédrico o prismático (figura 27), la malla basada en WED 15 y HEX 20, presentan un número de nodos alto (mayor a 1 millón con 0.5 mm de longitud del elemento), ya que estos presentan un número mayor de nodos por cada elemento, haciendo que el gasto computacional sea mayor, a diferencia de la malla basada en WED 6 y HEX 8 donde el número de nodos fue más bajo (menor a los 400000 con 0.5 mm de longitud del elemento), como se muestra en la figura 2, donde el número menor de nodos fue obtenido por la malla basada en HEX 8, de forma muy ligera con respecto a WED 6.

En la Figura 29 también se muestra el valor del delta de temperatura entre el valor interior (220° C) y el exterior obtenido por cada una de las mallas, donde se puede evidenciar nuevamente la estabilidad referida al mallado basado en WED 6 y HEX 8. Por lo tanto el tipo de elemento para la malla escogido para el análisis fue el HEX 8, basándose en la leve ventaja sobre el mallado basado en WED 6 respecto al número de nodos totales.

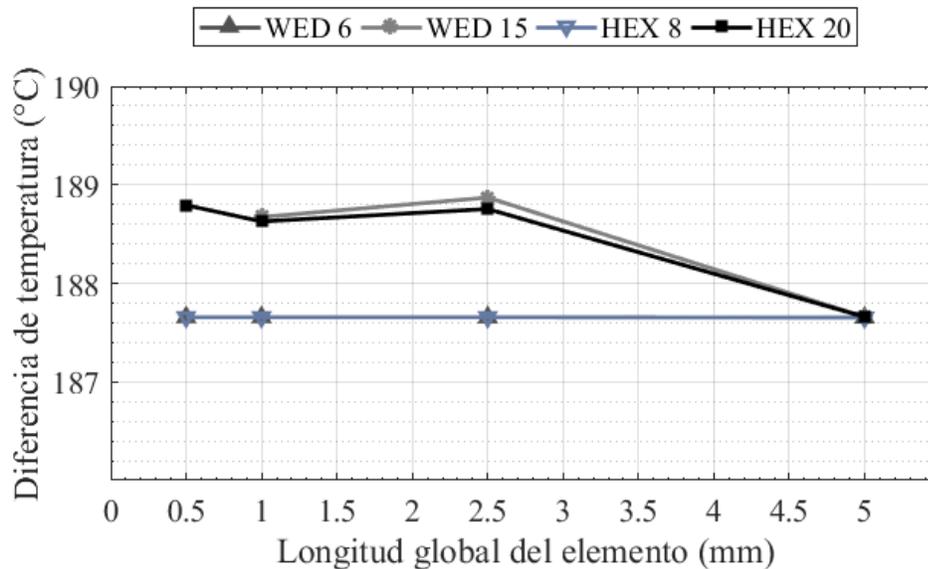


Figura 29: Diferencia de temperaturas exterior e interior para cada tipo de elemento
Fuente: Autor

De esta forma, se define que el tipo de elemento óptimo, para realizar las simulaciones donde los resultados no se ven afectados al usar un tamaño grande y con el fin de evitar el consumo computacional, es el elemento de tipo HEX 8. Este elemento fue el seleccionado para el mallado de las simulaciones tanto en estado estacionario como transitorio.

5.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL MATERIAL AISLANTE

Una vez determinados los materiales y realizada la inclusión de los materiales secundarios (láminas de acero y espuma de vidrio), se realizó la simulación de la configuración de los mismos. En la Figura 30 se muestra los resultados obtenidos, para la gráfica de temperatura exterior (°C) vs espesor, con cada uno de los materiales de prueba.

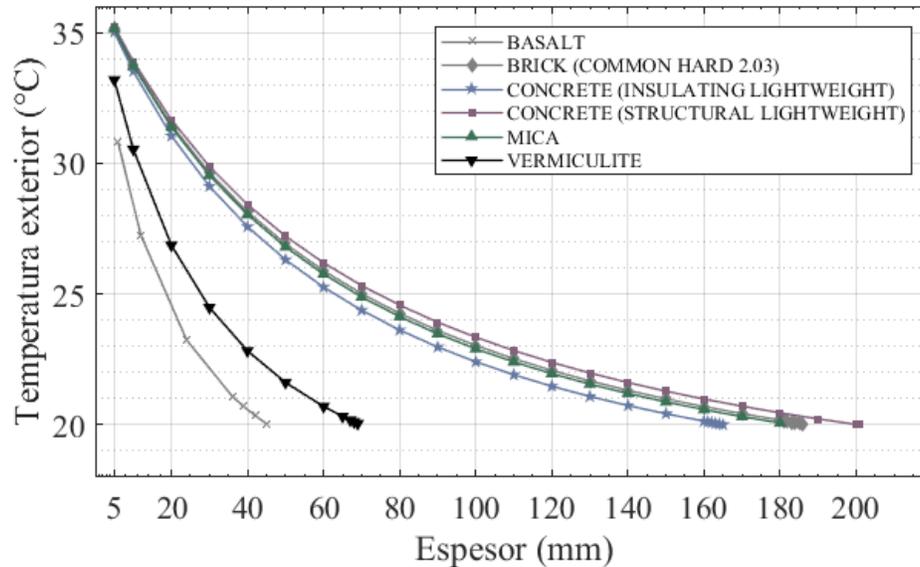


Figura 30: Gráfica de temperatura exterior contra espesor de cada material aislante
Fuente: Autor

Con los resultados mostrados en la Figura 30, se pudo evidenciar la capacidad de cada uno de los materiales aislantes, para evitar las pérdidas de calor al exterior (temperatura exterior baja), donde los materiales que lograron alcanzar la temperatura de 20 °C con un menor espesor fueron el basalto y vermiculita. Por su parte los materiales restantes, requirieron de un mayor espesor para poder alcanzar dicho valor de temperatura. Todos los materiales a excepción del basalto, tuvieron un espesor definido cada 10 mm, debido a su capacidad de fácil moldeo, para el caso del basalto, se definieron espesores aumentados cada 6 mm, que corresponde a un capa doble de 3 mm que es el espesor comercial.

A pesar de que se presentaron materiales que requirieron de un valor más bajo de espesor, para la reducción de la temperatura exterior, fue necesario determinar el material adecuado, con su costo a partir de la cantidad del material definida por el espesor característico. Para realizar este análisis, fue calculada la masa del material aislante, por medio de su densidad y su volumen (definida por el espesor).

Para la determinación del volumen, a partir del espesor de cada material y la geometría del dispositivo, se definió una ecuación característica, en función del espesor y el radio

interior del material aislante. Se partió de la definición de volumen de un cilindro hueco, donde el radio interior r_i es un valor constante de 67.175 mm, el valor del radio exterior r_e en mm, depende del espesor e del material y el radio interior, el cual queda definido como $r_e = r_i + e$. Al reemplazar los valores de radio correspondientes, en la fórmula de volumen de cilindro hueco se obtiene la ecuación (60)

$$V = \pi h[(r_i + e)^2 - r_i^2] \quad (60)$$

Donde volumen V se da en mm^3 y h representa la altura del cilindro cuyo valor es de 120 mm. Al solucionar el cuadrado y factorizar la ecuación (60), se obtiene la expresión final del volumen del material aislantes (ver ecuación (61)), a partir de las variables conocidas (espesor y radio interior).

$$V = \pi h e (2r_i + e) \quad (61)$$

La masa se determina con la multiplicación del volumen y la densidad del material, por lo tanto multiplicando la ecuación (61), por ρ que representa la densidad en m^3/Kg , característica del material, se obtiene la expresión de la masa del material aislante en Kg (ver ecuación (62)).

$$m = \frac{\rho \pi h e (2r_i + e)}{10^9} \quad (62)$$

Finalmente con el valor de masa de la ecuación (62), al multiplicar por el costo por kilogramo, fue fijado el precio total en COP, necesario para adquirir el material a partir de la ecuación.(63) La cual al sustituir cada valor correspondiente de densidad de cada material y su respectivo espesor.

$$C = c_m \frac{\rho \pi h e (2r_i + e)}{10^9} \quad (63)$$

Donde c_m representa el costo por kilogramo del material en (COP/Kg). Todos los valores de referencia (densidad y precio por kilogramo) fueron obtenidos a partir de la ficha técnica de cada material con el software Granta EduPack. En la Figura 31 se muestran los valores propios de cada material, donde se especifican los valores de espesor y costo total, obtenidos a partir de la Ecuación (63).

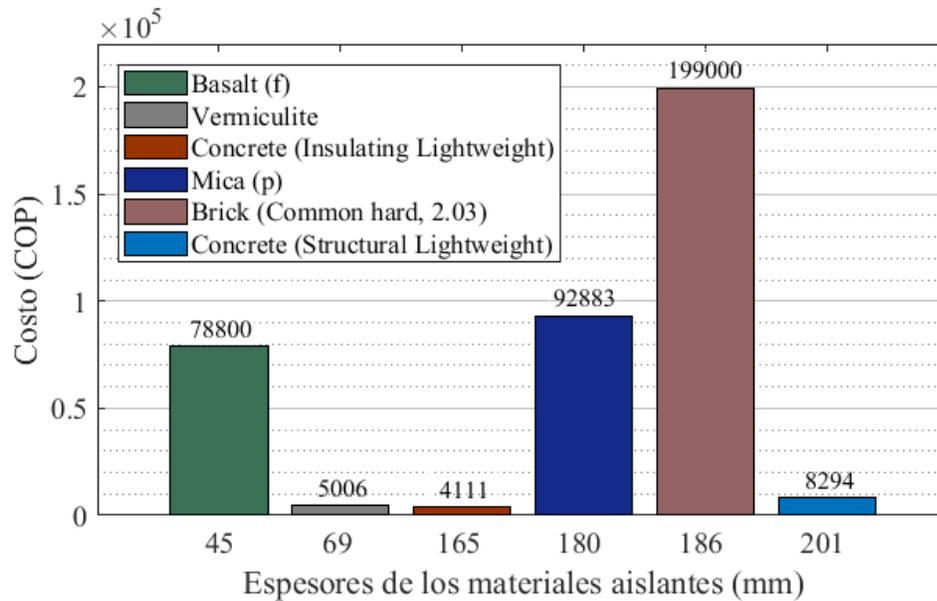


Figura 31: Costo de cada material aislantes según su espesor
Fuente: Autor

La Figura 31 muestra el costo total para cada cantidad de material aislante requerido, con la condición de temperatura exterior del dispositivo de 20°C. Entre los materiales con mayor costo total se encuentran el Basalto (78800 COP), la Mica (92883 COP) y el Ladrillo (199000 COP). El costo total del Basalto, fue afectado por ser el material con el mayor costo por kilogramo (9610 COP/Kg), a pesar de que al igual que la Vermiculita, presentó uno de los dos espesores más bajos. Para el caso de la Mica y el Ladrillo, representaron un alto costo total, debido a que fueron el segundo y tercero de los materiales con mayor espesor requerido, de 186 y 180 mm respectivamente. Pese a tener un precio por kilogramo de 1501.5 y 4375 COP/Kg que son valores intermedios, la gran cantidad requerida los hizo los dos materiales con más alto costo.

Entre los materiales con menor costo se encuentran el Concreto para aislamiento (4111 COP), la Vermiculita (5006 COP) y el Concreto estructural (8294 COP). Sin embargo, del Concreto para aislamiento y el Concreto estructural, presentaron espesores requeridos altos de 165 mm y 201 mm respectivamente, estos espesores con respecto a las dimensiones del dispositivo, son excesivas y no permitirían un diseño compacto y a baja escala que es uno de los objetivos para su construcción. En cambio, la Vermiculita, fue uno de los dos materiales que requirió de un menor espesor (69 mm) y por consiguiente una baja cantidad requerida de material., por lo tanto presentó un costo total relativamente bajo, a pesar de ser el material con el segundo costo por kilogramo más alto (8450 COP/Kg).

Por lo tanto, el material seleccionado para el aislamiento fue la Vermiculita, debido a que presentó uno de los dos espesores requeridos más bajos y se encuentra entre los tres materiales con menor costo total, siendo éste el segundo material menos costoso.

Finalmente, para el material seleccionado en la Figura 32, se muestra el perfil de temperaturas característico de los parámetros obtenidos mediante la simulación. Donde se puede apreciar el comportamiento de la temperatura, a través de cada una de las capas de los materiales propios de la configuración.

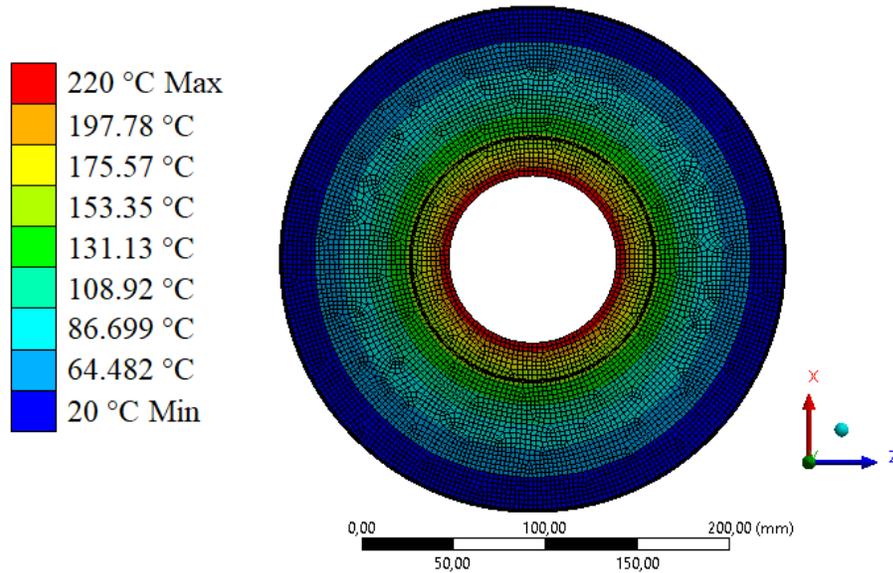


Figura 32: Perfil de temperaturas para el material seleccionado
Fuente: Autor

Para la comparación de los resultados obtenidos, se realizó la solución del modelo analítico definiendo las mismas condiciones y parámetros de la simulación para la vermiculita. En donde fueron definidos los radios de la geometría a partir del espesor característico de este material junto con su respectiva conductividad. En la figura 33 se evidencia la buena aproximación de los resultados obtenidos para el modelo analítico y el modelo por el método de elementos finitos en ANSYS.

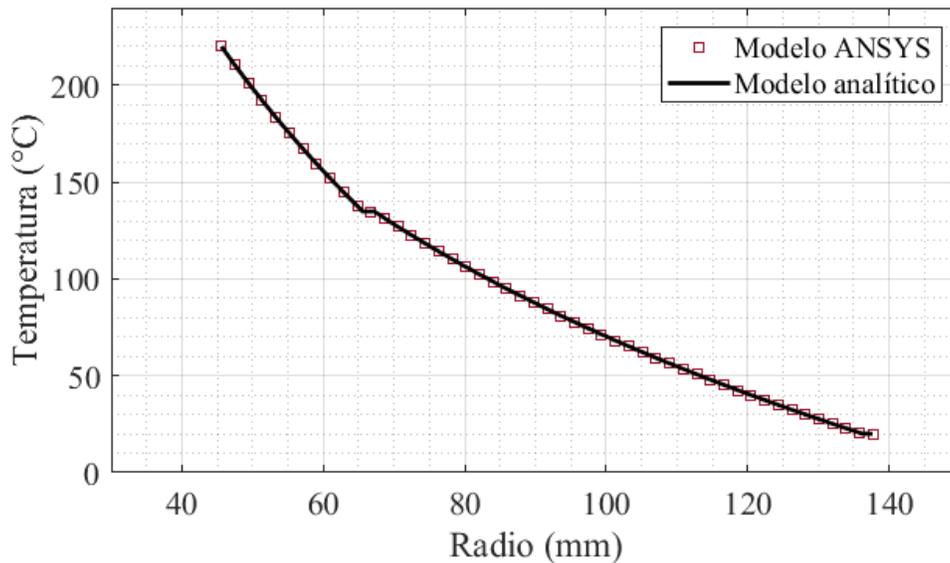


Figura 33: Aproximación del modelo analítico y el modelo en ANSYS
Fuente: Autor

5.4. TIEMPO REQUERIDO PARA LA FUNDICIÓN DEL LDPE

Al ser realizadas las diferentes pruebas de tiempo requerido para que el LDPE alcanzara la temperatura mayor a 200°C, por medio del aumento de tiempo cada 10 minutos, la temperatura alcanzada por los sensores #5 #6 y #7, fue de 202.34°C. Cuyo tiempo necesario correspondió a 70 minutos, es decir 1 hora con 10 minutos, por lo que se el número de pruebas realizadas antes de alcanzar el valor de temperatura en la parte central fueron 7. En la figura 34 se muestra el perfil final obtenido para el LDPE, donde se evidencia el comportamiento de a temperatura a través de la geometría.

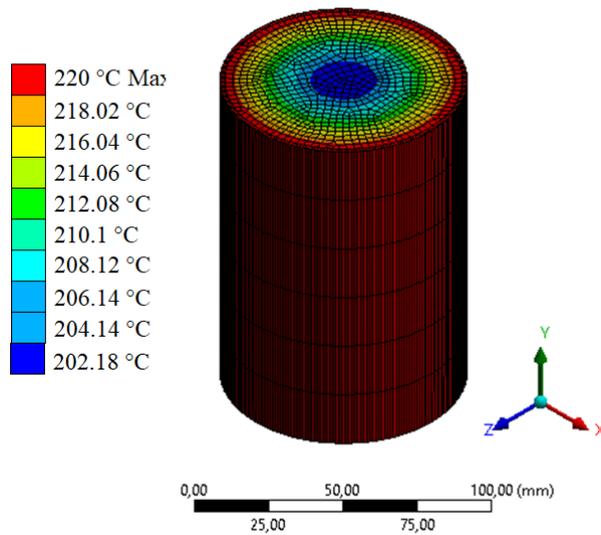


Figura 34: Perfil final de temperaturas del LDPE
Fuente: Autor

Con estas condiciones, se pudo garantizar una temperatura adecuada para el procesamiento del material de forma uniforme y otorgar un margen de operación para el sistema de calentamiento del dispositivo. En la figura 35 se muestran el comportamiento de la temperatura en función del tiempo de proceso.

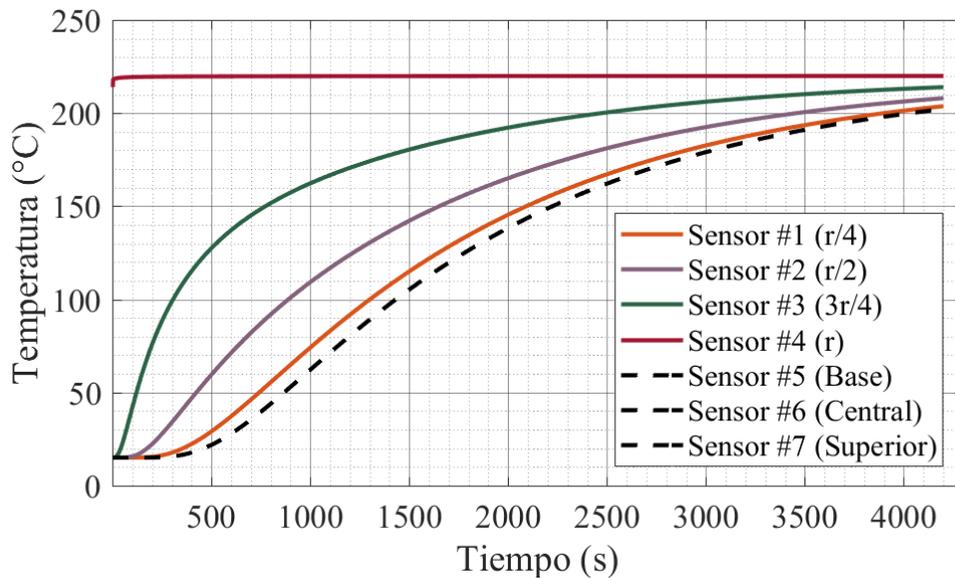


Figura 35: Variación de la temperatura en función del tiempo para los diferentes sensores
Fuente: Autor

Como se evidencia en la figura 35, la temperatura de 200 °C, para el sensor #4 fue alcanzada de forma casi inmediata, por la cercanía a la fuente de calor. En cambio, para el sensor #3 se

requirió un poco más de 40 minutos, para poder alcanzar dicha temperatura. Los sensores #1 y #2, necesitaron de un tiempo mayor a los 66 minutos, al igual que los sensores centrales (#5, #6, #7). De esta forma se puede evidenciar la gran cantidad de tiempo requerido para llevar a cabo el proceso de fundición, a pesar de ser un modelo de prueba a baja escala, Donde la principal razón fue la baja conductividad térmica del LDPE.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El modelo analítico usado para llevar a cabo el análisis se aproximó de buena forma a los resultados obtenidos por medio de simulación, a pesar de que para su solución se usaron métodos numéricos debido a la complejidad del mismo. Sin embargo, con la implicación de un cierto porcentaje de error con respecto a un modelo analítico exacto, los resultados obtenidos respaldaron la capacidad del uso del método de los elementos finitos para analizar la transferencia de calor, de una forma más visual y rápida.

Por medio de la metodología de Ashby es posible obtener una amplia gama de materiales para una aplicación determinada, de una forma más estructurada y objetiva. Para el caso de la selección de los materiales aislantes fue posible determinarlos de una forma más eficaz usando las propiedades más importantes relacionadas con el fenómeno físico presente en su aplicación, como lo fue la transferencia de calor, donde los dos pilares más importantes tenidos en cuenta fueron la conductividad térmica y la temperatura máxima de servicio.

A pesar de que los materiales obtenidos mediante la metodología de Ashby presentaban buenas propiedades aislantes, uno de los factores que influyó en su selección fue el precio, además de su presentación en el mercado, tal fue el caso del Basalto, donde a pesar de ser uno de los mejores materiales aislantes tanto por su precio como espesor, su presentación en espesores muy bajos, hace que se requiera de una gran cantidad del mismo para una buena cobertura, lo que genera una complicación a la hora de la fabricación del dispositivo a pesar de ser un modelo a baja escala.

El uso de materiales cerámicos es idóneo para aislamientos cuya geometría está bien definida o es muy compleja, ya que para otro tipo de materiales por sus especificaciones o forma serían muy difíciles de adaptar, tal es el caso de materiales laminados. Los cerámicos, por estar disponibles en el mercado en forma de partículas, mediante un aglutinante pueden ser adaptados a cualquier tipo de geometría sin perder sus propiedades. Sin embargo, debe ser analizado su costo y la cantidad requerida en cuanto a sobredimensionamiento.

En los resultados obtenidos para la simulación en ANSYS en estado estacionario, se pudo observar la gran capacidad contenida en el Basalto y la Vermiculita, los cuales fueron los materiales que alcanzaron una temperatura muy próxima a 20°C, con menores espesores respecto a los demás materiales, sin embargo una de las desventajas de los mismos, es su alto costo por unidad de masa. En contraste, los dos tipos de concreto necesitaron de un espesor más alto con respecto a los demás materiales, su bajo costo y fácil disponibilidad en el mercado los hace de las mejores opciones para su selección además de la facilidad de ser manejado. No obstante, se debe tener en cuenta el factor dimensional, debido a que para este

dispositivo se tenía que usar una cantidad sobredimensionada de ellos, lo que los hace inadecuados, tanto para el traslado y espacio requerido, y al tratarse de un dispositivo a baja escala se tendría un tamaño contraproducente.

En los resultados obtenidos para la simulación en ANSYS en estado transitorio, se pudo evidenciar que el tiempo requerido para la fundición del material fue alto, esto implica que el requerimiento con respecto a costos de energía para el proceso puede ser alto. Además, este tiempo fue posible estableciendo, condiciones de frontera adecuadas, ya que en caso de existir una condiciones diferente como lo puede ser la convección, el proceso para obtener una temperatura uniforme sobre toda la geometría se ve altamente afectado, donde la variación de temperatura entre el centro y el exterior es alta. Es necesario analizar y definir de forma adecuada cuales son los tipos de condiciones que se presentan en ambos extremos del dispositivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Coyle, G. Hardiman, and K. O. Driscoll, "Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes and uptake into ecosystems," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, p. 100010, 2020, doi: 10.1016/j.cscee.2020.100010.
- [2] H. H. Wu, "A study on transnational regulatory governance for marine plastic debris: Trends, challenges, and prospect," *Mar. Policy*, no. February, p. 103988, 2020, doi: 10.1016/j.marpol.2020.103988.
- [3] G. G. N. Thushari and J. D. M. Senevirathna, "Plastic pollution in the marine environment," *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04709, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04709.
- [4] A. Gracia C., N. Rangel-Buitrago, and P. Flórez, "Beach litter and woody-debris colonizers on the Atlántico department Caribbean coastline, Colombia," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 128, no. December 2017, pp. 185–196, 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.017.
- [5] J. Maris, S. Bourdon, J. M. Brossard, L. Cauret, L. Fontaine, and V. Montebault, "Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 147, no. October 2017, pp. 245–266, 2018, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001.
- [6] S. Devasahayam, G. Bhaskar Raju, and C. Mustansar Hussain, "Utilization and recycling of end of life plastics for sustainable and clean industrial processes including the iron and steel industry," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 634–646, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.08.002.
- [7] M. Biron, *Recycling Plastics: Advantages and Limitations of Use*. 2020.
- [8] C. A. Tshifularo and A. Patnaik, *Recycling of plastics into textile raw materials and products*. Elsevier, 2020.
- [9] E. Schmaltz *et al.*, "Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution," *Environ. Int.*, vol. 144, no. September, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106067.
- [10] A. M. Paramonov, "Heating furnaces efficiency improvement," *Procedia Eng.*, vol. 113, pp. 181–185, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.315.
- [11] H. Binici, O. Aksogan, A. Dincer, E. Luga, M. Eken, and O. Isikaltun, "The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 18, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100567.
- [12] W. Villasmil, L. J. Fischer, and J. Worlitschek, "A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 103, no. July 2018, pp. 71–84, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.040.
- [13] V. C. Tudor, A. Marin, D. Z. Vasca, M. M. Micu, and D. I. Smedescu, "The influence of the plastic bags on the environment," *Mater. Plast.*, vol. 55, pp. 595–599, 2018, doi: 10.37358/mp.18.4.5081.
- [14] E. Stauffer, J. A. Dolan, and R. Newman, "CHAPTER 3 - Review of Basic Organic Chemistry," E. Stauffer, J. A. Dolan, and R. B. T.-F. D. A. Newman, Eds. Burlington:

- Academic Press, 2008, pp. 49–83.
- [15] J. G. Speight, *Monomers, Polymers, and Plastics*. 2011.
- [16] W. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*, Quinta edi. 2014.
- [17] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Séptima ed. 2017.
- [18] A. P. B. T.-I. to A. M. Mouritz, Ed., “13 - Polymers for aerospace structures,” Woodhead Publishing, 2012, pp. 268–302.
- [19] S. Ronca, *Polyethylene*, no. 1930. Elsevier Ltd, 2017.
- [20] S. E. Selke and R. J. Hernandez, “Packaging: Polymers in Flexible Packaging,” K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. B. T.-E. of M. S. and T. Veyssiére, Eds. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 6652–6656.
- [21] M. Gilbert, “Relation of Structure to Thermal and Mechanical Properties,” *Brydson’s Plast. Mater. Eighth Ed.*, pp. 59–73, 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00004-9.
- [22] Y. Teck Kim, B. Min, and K. Won Kim, “Chapter 2 - General Characteristics of Packaging Materials for Food System,” in *Food Science and Technology*, J. H. B. T.-I. in F. P. (Second E. Han, Ed. San Diego: Academic Press, 2014, pp. 13–35.
- [23] G. Wypych and G. Wypych, “LDPE low density polyethylene,” *Handb. Polym.*, pp. 178–184, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-1-895198-92-8.50059-8.
- [24] N. S. Rao and N. S. Rao, “3 – Transport Properties of Molten Polymers,” in *Basic Polymer Engineering Data*, 2017, pp. 43–85.
- [25] S. Kalpakjian and S. Steven R., *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Tercera ed. 2014.
- [26] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, Tercera ed. 2007.
- [27] S. Ebnesajjad, “10 - Fabrication and Processing of Granular Polytetrafluoroethylene,” vol. 1, S. B. T.-F. (Second E. Ebnesajjad, Ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2015, pp. 177–233.
- [28] J. R. Wagner, E. M. Mount, and H. F. Giles, “3 - Single Screw Extruder: Equipment,” in *Plastics Design Library*, J. R. Wagner, E. M. Mount, and H. F. B. T.-E. (Second E. Giles, Eds. Oxford: William Andrew Publishing, 2014, pp. 17–46.
- [29] R. Boulahia *et al.*, “Deformation behaviour and mechanical properties of polypropylene processed by equal channel angular extrusion: Effects of back-pressure and extrusion velocity,” *Polymer (Guildf)*, vol. 50, no. 23, pp. 5508–5517, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.09.050>.
- [30] S. Ebnesajjad and P. R. Khaladkar, “5 - Manufacturing of Parts From Tetrafluoroethylene Homopolymers,” in *Plastics Design Library*, S. Ebnesajjad and P. R. B. T.-F. A. in the C. P. I. (Second E. Khaladkar, Eds. William Andrew Publishing, 2018, pp. 185–218.
- [31] R. Kent, “Chapter 5 - Processing,” R. B. T.-E. M. in P. P. (Third E. Kent, Ed. Elsevier, 2018, pp. 211–318.
- [32] Braskem, “Technical bulletin-Ram Extrusion,” pp. 1–5.
- [33] J. B. Ott and J. Boerio-Goates, “Chapter 1 - Introduction,” J. B. Ott and J. B. T.-C. T. P. and A. Boerio-Goates, Eds. London: Academic Press, 2000, pp. 1–36.
- [34] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, Cuarta Edi. 2011.

- [35] J. Silver, J.-P. Lalonde, T. Mihalik, and D. Wittenberger, "Chapter 7 - Medtronic CryoCath Technology," A. J. Bredikis and D. J. B. T.-C. of C. A. Wilber, Eds. Saint Louis: W.B. Saunders, 2011, pp. 81–90.
- [36] P. M. Doran, "8 - Heat Transfer," P. M. B. T.-B. E. P. Doran, Ed. London: Academic Press, 1995, pp. 164–189.
- [37] M. Ghassemi and A. Shahidian, "Chapter 3 - Biosystems Heat and Mass Transfer," M. Ghassemi and A. B. T.-N. and B. H. T. and F. F. Shahidian, Eds. Oxford: Academic Press, 2017, pp. 31–56.
- [38] P. Kosky, R. Balmer, W. Keat, and G. Wise, "Chapter 12 - Mechanical Engineering," P. Kosky, R. Balmer, W. Keat, and G. B. T.-E. E. (Third E. Wise, Eds. Boston: Academic Press, 2013, pp. 259–281.
- [39] M. F. Ashby, P. J. Ferreira, and D. L. Schodek, "Chapter 9 - Design Environments and Systems," M. F. Ashby, P. J. Ferreira, and D. L. B. T.-N. Schodek Nanotechnologies and Design, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2009, pp. 291–402.
- [40] H. Zhang, "12 - Heat-insulating Materials and Sound-absorbing Materials," in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, H. B. T.-B. M. in C. E. Zhang, Ed. Woodhead Publishing, 2011, pp. 304–423.
- [41] P. S. Liu and G. F. Chen, "Chapter Ten - Characterization Methods: Physical Properties," P. S. Liu and G. F. B. T.-P. M. Chen, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 493–532.
- [42] Y. Demirel and V. Gerbaud, "Chapter 2 - Transport and Rate Processes," Y. Demirel and V. B. T.-N. T. (Fourth E. Gerbaud, Eds. Elsevier, 2019, pp. 87–133.
- [43] G. B. T.-H. of N. A. Wypych, Ed., "12 - EFFECT OF NUCLEATING AGENTS ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES," ChemTec Publishing, 2016, pp. 205–215.
- [44] S. Basu, "Chapter 1 - Introduction and Fundamental Concepts," in *Micro and Nano Technologies*, S. B. T.-N.-F. R. H. T. A. N. V. G. Basu, Ed. William Andrew Publishing, 2016, pp. 1–44.
- [45] T. Kim, T. J. Lu, and S. J. Song, "Chapter 1 - Experimentation in Aerodynamics and Heat Transfer," T. Kim, T. J. Lu, and S. J. B. T.-A. of T.-F. M. T. Song, Eds. Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 1–12.
- [46] M. Colombo and M. Fairweather, "Application of CFD modelling to external nuclear reactor vessel cooling," in *28 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, vol. 43, A. Friedl, J. J. Klemeš, S. Radl, P. S. Varbanov, and T. B. T.-C. A. C. E. Wallek, Eds. Elsevier, 2018, pp. 1027–1032.
- [47] J. L. Monteith and M. H. Unsworth, "Chapter 11 - Mass Transfer: (i) Gases and Water Vapor," J. L. Monteith and M. H. B. T.-P. of E. P. (Fourth E. Unsworth, Eds. Boston: Academic Press, 2013, pp. 179–198.
- [48] D. U. Shah, "Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts," *Mater. Des.*, vol. 62, pp. 21–31, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.002.
- [49] A. Rashedi, I. Sridhar, and K. J. Tseng, "Multi-objective material selection for wind turbine blade and tower: Ashby's approach," *Mater. Des.*, vol. 37, pp. 521–532, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.12.048.
- [50] R. Bolivar, "Selección de materiales," in *Selección de materiales*, .
- [51] G. R. Liu and S. S. Quek, *FEM for Heat Transfer Problems*. 2014.

- [52] S. C. Chapra and P. R. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, Séptima ed. 2015.
- [53] G. R. Liu and S. S. Quek, "Chapter 3 - Fundamentals for Finite Element Method," G. R. Liu and S. S. B. T.-T. F. E. M. (Second E. Quek, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 43–79.
- [54] M. K. Mondal, B. P. Bose, and P. Bansal, "Recycling waste thermoplastic for energy efficient construction materials: An experimental investigation," *J. Environ. Manage.*, vol. 240, no. February, pp. 119–125, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.016.
- [55] I. M. Khan, S. Kabir, M. A. Alhussain, and F. F. Almansoor, "Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction," *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 1557–1564, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.196.
- [56] M. A. B. Animpong *et al.*, "Coupling effect of waste automotive engine oil in the preparation of wood reinforced LDPE plastic composites for panels," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 24, pp. 55–61, 2017, doi: 10.1016/j.sajce.2017.01.004.
- [57] W. L. Chen and K. L. Wong, "A reliable analytical method applied to heat transfer problems associated with insulated cylindrical tanks," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 2, pp. 679–687, 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2006.04.023.
- [58] M. Nowak-Ocłoń and P. Ocłoń, "Thermal and economic analysis of preinsulated and twin-pipe heat network operation," *Energy*, vol. 193, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116619.
- [59] M. Rezvani Rad and A. McDonald, "Mathematical simulation of heating and melting of solid ice in a carbon steel pipe coated with a resistive heating system," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 138, pp. 923–940, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.088.
- [60] M. Sakin, F. Kaymak-Ertekin, and C. Ilicali, "Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens," *J. Food Eng.*, vol. 94, no. 3–4, pp. 344–349, 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.03.027.
- [61] D. Czarnecka-Komorowska, K. Wiszumirska, and T. Garbacz, "Films Ldpe/Lldpe Made From Post - Consumer Plastics: Processing, Structure, Mechanical Properties," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 134–142, 2018, doi: 10.12913/22998624/92205.
- [62] Y. Teymouri and H. Nazockdast, "The effect of process parameters on physical and mechanical properties of commercial low density polyethylene/ORG-MMT nanocomposites," *J. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 20, pp. 6642–6647, 2011, doi: 10.1007/s10853-011-5616-3.
- [63] A. Bahadori, *Material Selection for Thermal Insulation*. 2014.
- [64] K. G. Ambli, B. M. Dodamani, A. Jagadeesh, and M. B. Vanarotti, "Heterogeneous composites for low and medium temperature thermal insulation: A review," *Energy Build.*, vol. 199, pp. 455–460, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.024.