



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO INICIAL PARA EL USO DE  
MATERIALES COMPUESTOS DE  
RESINA EPÓXICA Y FIBRAS DE COBRE  
CON EL FIN DE CREAR MOLDES DE  
INYECCIÓN PARA PRODUCCIONES  
CORTAS O PRE- SERIES**

**MARÍA SOLEDAD RODRÍGUEZ ALLIENDE**

Tesis para optar al grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**CONSTANZA MIRANDA Y JORGE RAMOS**

Santiago de Chile, Octubre, 2020

© 2020, María Soledad Rodríguez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**ESTUDIO INICIAL PARA EL USO DE  
MATERIALES COMPUESTOS DE  
RESINA EPÓXICA Y FIBRAS DE COBRE  
CON EL FIN DE CREAR MOLDES DE  
INYECCIÓN PARA PRODUCCIONES  
CORTAS O PRE- SERIES**

**MARÍA SOLEDAD RODRÍGUEZ ALLIENDE**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**CONSTANZA MIRANDA**

**JORGE RAMOS**

**RICARDO HERNÁNDEZ**

**GIOVANNI MEDRANO**

**CHRISTIAN LEDEZMA**

Para completar las exigencias del grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería  
Santiago de Chile, Octubre, 2020

A mi familia y amigos, en especial  
a mi papá .

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Iñaki Goñi por el constante apoyo, buena disposición desde el inicio y por su mentoría durante el proceso de investigación. También agradezco su buen carácter y simpatía que lograba hacer de las reuniones semanales de magíster un ambiente de aprendizaje agradable, interactivo y entretenido.

A Constanza Miranda quién además de ser mi profesora guía durante el magíster, me inspiró a seguir la línea del diseño e innovación dentro de la ingeniería. Agradezco su traspaso de su conocimiento, experiencia y criterio que fueron imprescindibles durante el desarrollo de la investigación. También le agradezco el haberme fomentado continuamente la proactividad, la curiosidad y el optar por lo que me apasiona.

Agradezco al profesor Jorge Ramos quién estuvo siempre ahí para guiarme paso a paso en la fase experimental del estudio. Su ayuda y disposición fue muy importante para llegar a resultados válidos y cumplir los objetivos de la investigación.

Por último, agradezco a Hellen Fuenzalida, Ivania Yovanovic y Trinidad Sotomayor, mis compañeras del grupo de investigación, quienes siempre me dieron *feedback*, respondieron mis dudas y fueron una compañía muy valiosa.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	x
1. MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1 Inyección por molde	6
3.2 Molde de inyección	7
3.3 Indicadores de eficacia en la inyección	9
3.4 Materiales compuestos	10
3.5 Arquitecturas y orientaciones	11
3.6 Comportamiento de materiales compuestos con fibras largas	12
3.6.1 Comportamiento mecánico	13
a) Módulo de Young ( $E$ )	13
b) Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	14
3.6.2 Comportamiento térmico	17
a) Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ )	17
b) Conductividad térmica ( $k$ )	19
c) Calor específico ( $C$ )	21
3.7 Comportamiento de materiales compuestos con refuerzo particulado	21
3.7.1 Comportamiento mecánico	22
3.7.2 Comportamiento térmico	22

3.8. Selección de materiales	23
3.9. Propiedades y características de la resina epóxica	24
3.10. Propiedades y características del cobre	26
3.11. Relevancia del estudio	28
4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	29
4.1. Objetivo	29
4.2. Hipótesis	29
5. METODOLOGÍA	30
5.1. Etapa 1: Cálculo de las propiedades de los materiales de molde	31
5.2. Etapa 2: Simulación y análisis de la inyección	32
5.2.2 Autodesk Moldflow	33
5.2.3. Análisis preliminar para distintas concentraciones de cobre y espesor de pared	35
5.2.4 Pieza	38
5.2.5 Molde de la pieza	40
5.2.6 Polímero a inyectar	42
5.2.7 Otras configuraciones para la simulación	43
6. RESULTADOS	44
6.1. Resultados de la Etapa 1: Cálculo de las propiedades de los materiales de molde propuestos	44
6.2. Resultados de la Etapa 2: Simulación y análisis de la inyección	45
6.3. Análisis de perturbación	46
7. CONCLUSIONES	50
8. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO	51
9. REFERENCIAS	53
10. ANEXOS	57
ANEXO A: SCRIPT DEL CÓDIGO PYTHON	58



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla comparativa de costos de moldes .....	4
Tabla 2. Propiedades del cobre .....	25
Tabla 3. Propiedades de las resinas epóxicas .....	26
Tabla 4. Materiales de molde propuestos .....	30
Tabla 5. Características geométricas de la pieza .....	40
Tabla 6. Características del molde de la pieza .....	41
Tabla 7. Información del polímero PLA inyectable .....	43
Tabla 8. Propiedades de los materiales de molde .....	44
Tabla 9. Resultados de las simulaciones .....	45
Tabla 10. Escenarios del análisis de perturbación .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de investigación	3
Figura 2. Proceso de moldeo por inyección.	7
Figura 3. Molde de inyección y sus partes principales.	9
Figura 4. Tipos de materiales compuestos.	12
Figura 7. Imagen de carretes de lana de cobre.	27
Figura 8. Obtención de las propiedades de los materiales de molde.	32
Figura 9. Diagrama del proceso de evaluación de los materiales.	33
Figura 10. Gráfico de la contracción volumétrica para fibras horizontales	36
Figura 11. Gráfico de la contracción volumétrica para fibras verticales.	36
Figura 12. Gráfico de la deflexión por contracción fibras horizontales.	36
Figura 13. Gráfico de la deflexión por contracción para fibras verticales.	37
Figura 14. Gráfico de los tiempos de expulsión de la pieza para fibras horizontales.	37
Figura 15. Gráfico de los tiempos de expulsión de la pieza para fibras verticales.	38
Figura 16. Imagen del dispositivo de caso de estudio	39
Figura 17. Imágenes del modelo 3D de la pieza a moldear	39
Figura 18. Vistas frontal y trasera del molde de la pieza	41
Figura 19. Gráfico de la contracción volumétrica, análisis de perturbación	47
Figura 20. Gráfico de la deflexión máxima en la pieza, análisis de perturbación	48
Figura 21. Gráfico del tiempo de refrigeración, análisis de perturbación	49

## RESUMEN

Si bien la innovación y la acción emprendedora en Chile es cada vez mayor, la cantidad de emprendimientos que desarrollan productos tecnológicos, como dispositivos electrónicos o *hardware*, pareciera no crecer al mismo ritmo según los datos de emprendimientos publicados por CORFO (<http://dataemprendimiento.corfo.cl/>). Esto podría deberse a los altos costos que implicaría manufacturar piezas físicas de dispositivos tales como encapsulamientos plásticos o “*casings*”. Generalmente, éstos son fabricados mediante inyección por molde y sus costos no se amortizan debido a que se necesitan pequeñas cantidades o pequeñas series. La inyección por molde es un método de manufactura que puede llegar a ser elevado en Chile. Esto, específicamente en relación a los costos manejables por un emprendimiento naciente o “*startup*”. Su alto costo es usualmente debido a que la herramienta principal, el molde, puede ser compleja de fabricar. Su proceso de fabricación implica muchas horas de diseño e ingeniería. Ocupa materiales costosos como acero, aluminio o aleaciones de bronce que no son fáciles de maquinar.

Una alternativa a la inyección por molde útil para pequeñas series de productos y de bajo costo es la utilización de moldes de inyección de resina epóxica. Esta es un polímero altamente resistente, accesible y de fácil manipulación. Sin embargo, al tratarse de un polímero, la conductividad térmica de este tipo de moldes es muy baja. Esto afectaría directamente los tiempos del proceso de inyección y los resultados de las piezas plásticas finales, en particular debido a la baja conductividad de la resina lo que aumenta los tiempos de enfriamiento y por ende los del proceso completo.

Es en este contexto que surge la oportunidad de **augmentar la conductividad térmica de los moldes de resina epóxica mediante la inclusión de fibras de un material altamente conductor como el cobre**. El objetivo de este estudio es proporcionar una mejora a un método de manufactura accesible y altamente demandado por emprendimientos tecnológicos nacientes o “*startups*”.

En esta investigación, se utilizó un encapsulamiento o “*casing*” plástico de un dispositivo electrónico como caso de estudio. Para esta pieza se diseñaron moldes de inyección de distintos materiales compuestos formados a partir de resina epóxica

reforzada con fibras de cobre de distintas formas y orientaciones. Luego se realizaron simulaciones computacionales de inyección con los moldes diseñados usando el *software* Autodesk MoldFlow®. Los resultados de la simulaciones fueron comparados con el fin de determinar cuál es el material del molde con mejor desempeño para la pieza de caso de estudio.

De esta investigación se concluye que incluir cobre en la matriz de un molde de resina epóxica permitiría reducir significativamente el tiempo del ciclo de inyección y mejorar la contracción volumétrica de la pieza resultante. También se concluye que la forma en la que se obtienen mejores resultados es al incluir cobre en forma de fibras continuas orientadas según el flujo de calor y que sean largas, es decir, fibras cuya longitud sea igual a la extensión del molde en la dirección en la que son orientadas. De esta forma se logró el objetivo de estudiar una mejora a la inyección en moldes de resina epóxica para la producción de series cortas.

Palabras Claves: Moldes de inyección, resina epóxica, Autodesk MoldFlow®, pre-series, emprendimientos tecnológicos, materiales compuestos.



## ABSTRACT

Although innovation and entrepreneurial action in Chile are increasing, the number of enterprises that develop technological products, such as electronic devices or hardware, does not seem to be growing at the same rate according to the data of enterprises published by CORFO (<http://dataemprendimiento.corfo.cl/>). This could be due to the high costs involved in manufacturing physical parts of devices such as plastic encapsulations or “casings”. Generally, they are manufactured by injection molding and their costs are not amortized due to the need for small lot quantities or low-run production. Mold injection is a manufacturing method that can be expensive in Chile. This, specifically concerning the manageable costs for a nascent enterprise or startup. Its high cost is usually because the main tool, the mold, can be complex to manufacture. Its manufacturing process involves many hours of design and engineering. It occupies expensive materials such as steel, aluminum, or bronze alloys that are not easy to machine.

A low-cost alternative to injection molding for a small series of products is the use of injection molds of epoxy resin. This is a highly resistant, accessible, and easy-to-handle polymer. However, as it is a polymer, the thermal conductivity of this type of mold is very low. This would directly affect the times of the injection process and the quality of the final plastic parts.

In this context, that arises the opportunity to **increase the thermal conductivity of epoxy resin molds by including fibers of a highly conductive material such as copper**. The objective of this study is to provide an improvement to an accessible manufacturing method that is highly demanded by nascent technological enterprises or startups.

In this research, a plastic encapsulation or casing of an electronic device was used as a case study. For this product, injection molds of different composite materials made by epoxy resin reinforced with copper fibers of different shapes and orientations were designed. Computer simulations of the injection process were then performed with the designed molds using Autodesk Moldflow® software. The results of the simulations

were compared in order to determine which is the best performing mold material for the case study piece.

From this research, it is concluded that including copper in the matrix of an epoxy resin mold would significantly reduce the injection cycle time and improved the volumetric contraction of the resulting part. It is also concluded that the best results are obtained by including copper in the form of continuous fibers oriented according to the heat flux and that are long, that is, fibers whose length is equal to the extension of the mold in the direction in which are oriented. In this way, the objective of studying an improvement to the injection process of epoxy resin molds for the production of short series was achieved.

Keywords: Injection mold, epoxy resin, Autodesk MoldFlow®, low-runs, composite materials, technological ventures.

## 1. MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación surgió a partir de una exploración cualitativa sobre las dificultades y limitaciones que podrían tener los emprendimientos en Chile. Particularmente, apuntaba a los que buscaban lanzar un producto tecnológico físico o “*device*” al mercado. A nivel regional, esta exploración consistió en 9 entrevistas no estructuradas siguiendo el método de levantamiento de información planteado por Russell Bernard en su libro *Research Methods in Anthropology* (1995). Estas entrevistas fueron realizadas a distintos emprendedores y jefes de proyectos en incubadoras de emprendimientos, o mejor conocidas, *startups*. Particularmente, los emprendedores entrevistados pertenecían a *startups* que desarrollan dispositivos electrónicos. Lo transversal a estos dispositivos era la presencia de un *hardware*. Este corresponde a los componentes electrónicos y un soporte físico que permite la interacción entre el usuario y el dispositivo. Así mismo, esta protege los componentes internos. Estos emprendimientos, a diferencia de emprendimientos tecnológicos que no requieren de un *hardware*, se caracterizan por enfrentar una etapa de fabricación de sus productos.

En las entrevistas se les preguntó sobre el proceso de crecimiento de sus *startups*, las características del producto que estaban desarrollando, y sobre las principales dificultades que han enfrentado en cada etapa. La información levantada fue analizada cualitativamente según la metodología de la Teoría Fundamentada (*Grounded Theory*) según la perspectiva de Anselm Strauss y Juliet Corbin (1990). El análisis cualitativo de datos consistió, primero en transcribir las entrevistas y luego realizar una codificación abierta. Cada código utilizado representa una descripción de un tema particular manifestado en las entrevistas y que proviene de la interpretación del investigador. Esta codificación permitió reducir la información jerarquizando los códigos y agrupándolos en *clusters* o conceptos generales, según el grado de relación entre ellos (Strauss & Corbin, 1990). La información obtenida fue triangulada (Denzin, 2012) con información disponible de fuentes secundarias sobre emprendimientos tecnológicos en Chile. A partir de este análisis se pudo identificar las características de los emprendimientos que necesitan fabricar productos físicamente, sus etapas de vida, y las dificultades que enfrentan en Chile.

Este análisis permitió corroborar que algunos de los emprendimientos tecnológicos nacientes, tienen dificultades con los altos costos de manufactura de su *hardware*. Para ellos, la etapa de fabricación es la que implica mayor inversión y por ende mayor incertidumbre. Según los datos, este obstáculo es aún mayor cuando partes del dispositivo deben ser manufacturadas mediante inyección en molde.

Lo anterior ha llevado a la búsqueda de opciones de manufactura de bajo costo principalmente en China. En el trabajo de titulación de ingeniería comercial realizado por Cristián Godoy y Constanza Ortega (2012) se aportan antecedentes y pautas para importar productos desde dicho país. En este trabajo también se exponen los riesgos que existen al encargar la fabricación a medida de un artículo a proveedores del país oriental. Estos riesgos se tratan principalmente de posibles fallas en los productos, diferencias con el modelo original y atrasos en los tiempos de entrega. Estos se deben a que no es posible supervisar el proceso de producción, tampoco revisar el producto antes de que sea enviado a Chile, y además existe una diferencia horaria de 12 horas que puede ralentizar el proceso y complejizar la comunicación entre las partes.

Con todo lo anterior, este estudio cualitativo preliminar permitió definir una oportunidad de intervención basada en las necesidades y requerimientos de los emprendimientos tecnológicos que buscan fabricar productos físicos tecnológicos actualmente en Chile. La oportunidad, la cual es definida a continuación, fue tomada como motivación y eje principal a partir del cual se desarrollará la investigación experimental aplicada.

*Los emprendimientos tecnológicos, que requieren fabricar piezas mediante inyección por molde, tienen la necesidad de producir series cortas mediante un método de fabricación accesible, manteniendo la calidad y exigencia de un producto final. Esto sin el riesgo, incertidumbre e inercia que puede implicar hacerlo en China.*

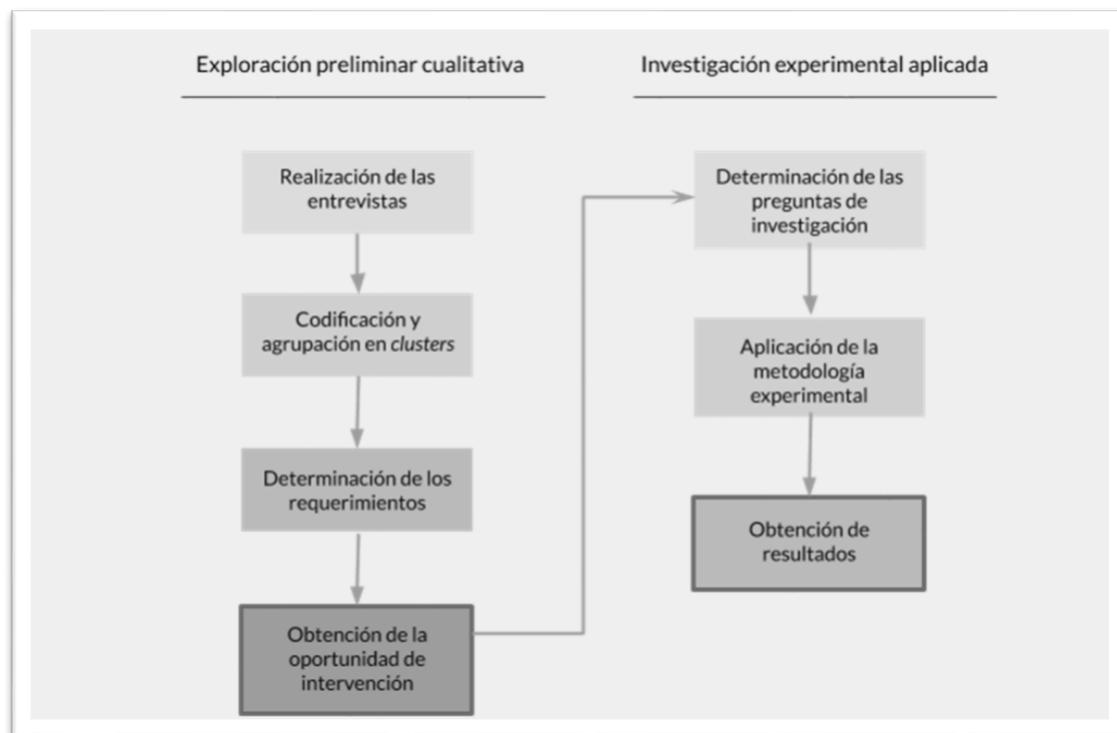


Figura 1. Diagrama de las etapas de las fases cualitativa y experimental del proceso de investigación. Elaboración propia.

## 2. INTRODUCCIÓN

Chile es un país que se ha destacado en Latinoamérica por su ecosistema de emprendimiento (González-Uribe, 2015). Durante el 2017, un 25% de los emprendimientos chilenos buscaban crear un producto (CORFO, 2018). Dentro de éstos se encuentran emprendimientos tecnológicos (ET). La rentabilidad de los ET es difícil de estimar debido a su novedad, incertidumbre financiera y su alta inversión en manufactura. Esta última es la razón por la cual muchos de ellos fracasan (Cruz, 2008).

Con el fin de minimizar el riesgo de estos ET, se sugiere la fabricación de una pre-serie (Rodríguez, 2006). Una pre-serie es una cantidad reducida e inicial de productos

fabricados con los métodos de manufactura definidos. Esto permite identificar defectos y validar los procesos de producción definitivos (Karol y Nelson, 2007).

La fabricación de una serie corta se dificulta cuando se debe usar inyección plástica por molde (IPM). Este método consiste dar forma a polímero termoplástico fundido inyectándolo dentro de un molde generalmente de acero, aluminio o aleaciones de bronce (Rosato et al., 2000; Rees , 2001; Montilla, 2006; Menges et al., 2001). Este proceso que se inicia con la inyección del polímero y finaliza con la obtención de la pieza conformada se denomina ciclo de inyección (Kamal et al., 2009).

La IPM no es monetariamente rentable para pequeñas *startups* cuyo objetivo es fabricar una pre-serie, puesto que cuentan con escasos recursos para ello. El costo del molde para inyectar es alto dado el material con el que se fabrican, su diseño, y procesamiento (Folgado et al., 2010; Wang et al., 2003).

Una alternativa de costo reducido es el uso de moldes de resina epóxica. En la Tabla 1 se muestra una comparación de costos entre un molde convencional y un molde de resina epóxica basado en el estudio realizado por Folgado, Pecas y Henriques (2010) titulado *Life cycle cost for technology selection: A Case study in the manufacturing of injection moulds*. Estos moldes de resina, si bien no permiten obtener los mismos volúmenes de producción que los moldes convencionales ya que su resistencia es inferior, sí son capaces de moldear una cantidad reducida de piezas con buen acabado y calidad (Kuo, 2012; Ma et al., 2007). La resina epóxica de la cual están hechos es un polímero de alta resistencia, muy estable, pero de baja conductividad térmica. Su baja conductividad causa una mala refrigeración durante la inyección (Pouzada, 2009). Lo anterior hace que el tiempo de solidificación del polímero aumente y además, puede afectar el enfriamiento haciendo que éste no sea uniforme y por lo tanto causar contracciones irregulares en la forma (Prashanth Reddy y Panitapu, 2017).

*Tabla 1*

*Tabla comparativa de costos*

Molde convencional	Molde de resina epóxica
--------------------	-------------------------

Ítem	Costo	Porcentaje	Ítem	Costo	Porcentaje
Materiales	355,47 €	11%	Materiales	261,36 €	31,25%
Fresado	1.804,30 €	58%	Curado de resina	68,35 €	8,17%
Taladreado	161,50 €	5%	Fresado	193,00 €	23,08%
Encaje	791,70 €	25%	Encaje	313,60 €	37,50%
Total	3.112,97 €		Total	836,31 €	

*Nota.* En la tabla se comparan los costos para la fabricación de un molde convencional y otro de resina epóxica para una misma pieza. Adaptado de “*Life cycle cost for technology selection: A Case study in the manufacturing of injection moulds*”, Folgado, Pecas y Henriques, 2010, *International Journal of Production Economics*, 128, p. 371.

En esta investigación se estudiará si una mejora en la conductividad térmica de un molde de resina epóxica permite optimizar los tiempos del proceso de inyección y obtener mejores resultados en las piezas moldeadas. Para esto se diseñarán moldes de materiales compuestos a partir de resina epóxica y de fibras de cobre que es un metal altamente conductor térmico. También se investigará si la forma y orientación de estas fibras es un factor influyente en el rendimiento del molde durante el proceso de inyección y en la calidad de las piezas finales. El método de estudio empleado es el modelamiento matemático y la simulación computacional de inyección plástica mediante el *software* Autodesk MoldFlow®.

El propósito final de este estudio es explorar un método de manufactura basado en la inyección por molde de bajo costo, en base a materiales accesibles y de fácil procesabilidad. Esto con el fin de dar alternativas de fabricación de pre-series que se adapten a las necesidades y recursos económicos de pequeñas empresas y emprendimientos.

### 3. MARCO TEÓRICO

Para la modelación de la inyección en un molde de resina epóxica reforzado con fibras de cobre, fue necesario estudiar los conceptos teóricos involucrados más importantes. El estudio de estos conceptos consistió en una revisión de publicaciones previas. A

continuación se explica detalladamente en qué consiste la inyección por molde y los materiales compuestos.

### **3.1 Inyección por molde**

Como lo explican Rosato. D, Rosato. D y Rosato. M. en su libro *Injection Molding Handbook* (2000) el proceso requiere de tres elementos principales. En la Figura 2, se muestra la unidad de inyección. Esta consiste en un tornillo rotatorio en cuya parte posterior se ubica un pistón. Esta unidad tiene la función de fundir los gránulos, o mejor conocidos, *pellets* de polímero termoplástico que se almacenan en el sistema de alimentación. Una vez que alcanzan la temperatura e índice de fluidez adecuado, el polímero es inyectado a alta presión dentro del segundo elemento principal: el molde.

El molde es la herramienta que da forma a la resina plástica fundida según la cavidad donde ésta se deposita. La resina se solidifica al interior de este elemento, y luego la unidad de apertura se encarga de abrir el molde para liberar la pieza solidificada. Esta última unidad corresponde al tercer elemento de la inyección y es la encargada de mantener el molde cerrado durante la inyección y su posterior apertura, mediante la acción de fuerzas (Yu et al., 2010). Una vez abierto el molde, la pieza formada puede caer libremente, ser removida de la cavidad por un brazo robótico o empujada por un eyector.

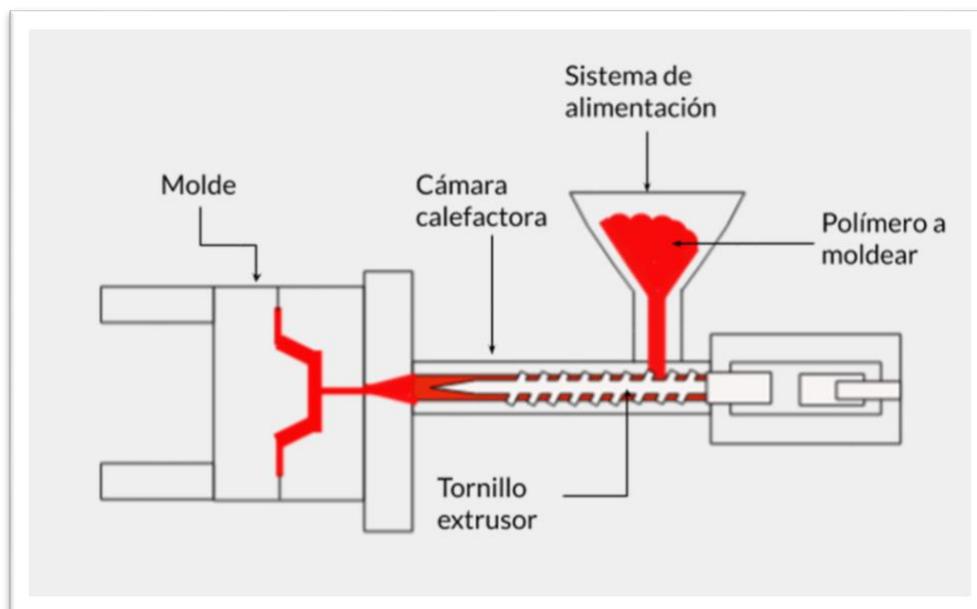


Figura 2. Proceso de moldeo por inyección en máquina inyectora. Elaboración propia.

### 3.2 Molde de inyección

Como bien lo explica Herbert Rees en su libro *Understanding Injection Mold Design* (2001), un molde es una pieza compleja conformada básicamente por un bloque que contiene una cavidad y núcleo, una línea de partición, un bebedero, y canales de refrigeración. Estos cuatro componentes, que se muestran en la Figura 3, son descritos y caracterizados por Rees de la siguiente manera:

a) Cavidad y núcleo:

La cavidad es el espacio cóncavo que se sitúa en una de las dos secciones del molde. Por su parte el núcleo es la forma convexa que se sitúa en la otra sección. El espacio interior del molde generado por la unión de la cavidad con el núcleo, mediante un cierre perfecto de las dos secciones, tiene la forma del negativo de la pieza que se quiere moldear. Es en este espacio donde se inyecta a presión el plástico fundido.

b) Línea de partición

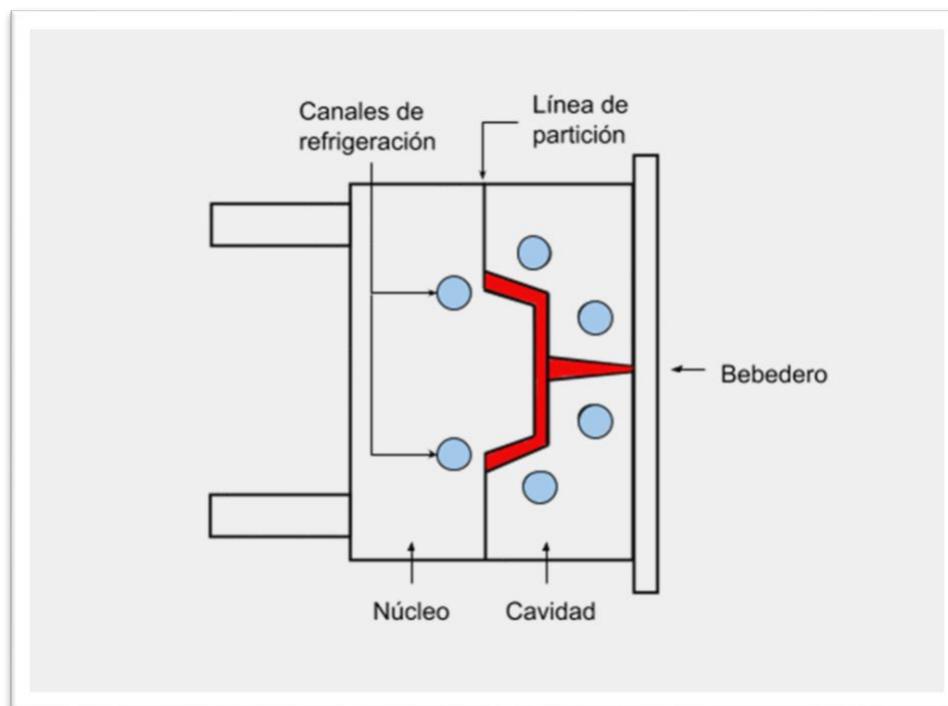
Se le llama línea de partición a la sección transversal del bloque del molde que separa la cavidad del núcleo. Generalmente, es una superficie plana cuya orientación se corresponde con la de mayor ancho de la pieza a formar. Esto es para asegurar que la pieza no se atasque durante la liberación.

c) Bebedero.

El bebedero es el canal por donde ingresa el plástico fundido a alta presión. Su posición en el molde debe asegurar que el plástico llegue a todas las esquinas de la cavidad y núcleo sin solidificarse en el proceso. Existen moldes que, por su complejidad, requieren más de un bebedero.

d) Canales de refrigeración.

Los canales de refrigeración están situados en el interior del molde, específicamente posterior a la cavidad y al núcleo. A través de ellos fluye líquido refrigerante cuya función es evacuar homogéneamente el calor del molde para asegurar que el plástico fundido baje su temperatura y se solidifique.



*Figura 3. Molde de inyección y sus partes principales. Elaboración propia.*

Generalmente, los moldes de inyección son fabricados a partir de acero de distintos tipos: aluminio de alta resistencia, bronce, aleaciones y resinas epóxicas (Rees, 2001; Montilla, 2006; Menges & Walter Mohren, 2001). Dentro de las características que deben tener los materiales usados para hacer moldes son: una alta resistencia a la compresión, una adecuada resistencia a la temperatura y a la abrasión. Además, deben tener una suficientemente alta conductividad térmica, baja deformación y aceptable resistencia química (Gonzalez & Maffia, 2017).

### **3.3 Indicadores de eficacia en la inyección**

Dentro de las características más importantes evaluadas en un proceso de inyección y que definen su eficacia es el tiempo de ciclo y la deformación de la pieza final. Esto último es causado por una contracción volumétrica irregular en la pieza que genera deflexión. Esto hace que la forma final no corresponda con el modelo de la pieza. Numerosos estudios han demostrado que estas tres variables, o indicadores de eficacia

del proceso, están directamente relacionadas con los parámetros de inyección y el material del molde (Hassan, 2013; Ozcelik et al., 2010; Kovacs & Bercsey, 2005).

El tiempo de ciclo corresponde al tiempo transcurrido desde que se inyecta el polímero fundido dentro de la cavidad del molde hasta que la pieza se solidifica completamente y es liberada. Este tiempo depende de la temperatura a la que el plástico es inyectado, la conductividad térmica del material del molde, la geometría de la cavidad y el sistema de refrigeración. A menor tiempo de ciclo, más piezas por unidad de tiempo se pueden obtener y por lo tanto es más rentable el proceso de inyección.

La contracción volumétrica corresponde a la reducción de volumen local en la pieza moldeada. De esta forma, las dimensiones de la pieza pueden verse alteradas, e incluso acumular tensiones residuales. Esta condición depende de la geometría de la cavidad, la conductividad térmica del molde, la presión de inyección, y de las características del polímero inyectado.

Por último la deflexión es una consecuencia del cambio de ángulo que genera la contracción en partes específicas de la pieza. Este cambio de ángulo hace que la forma de la pieza cambie, ya que cambian las proyecciones de sus partes. Y como resultado se obtiene una pieza deformada.

### **3.4 Materiales compuestos**

La selección del material del molde es un aspecto importante tanto para el tiempo de ciclo como en el surgimiento de contracciones y deflexiones no deseadas en la pieza. Es por esto que una mejora en las propiedades térmicas y mecánicas de la resina epóxica puede influir positivamente en el desempeño del molde, tanto en las piezas moldeadas como en el proceso mismo de inyección.

Una manera conocida de modificar las propiedades de algunos materiales es mediante la inclusión de fibras de otros materiales convirtiéndolo en un **material compuesto** (Yi, Du, & Zhang, L., 2017). El primer componente es la matriz que es el material que se

busca reforzar. El segundo componente son las fibras, estas pueden ser de distintos largos, formas y secciones. Generalmente las fibras son de un material que presenta mejores características químicas, térmicas o mecánicas que la matriz según la aplicación que se desea. Por lo tanto, se espera que el material compuesto resultante posea mejores propiedades que la matriz por sí sola (Rana & Figueiro, 2016).

El reforzamiento de moldes de resina epóxica con otros materiales no es algo nuevo. En el año 2007 Ma, Balaj, Gibson y Hu, estudiaron el comportamiento de moldes de resina epóxica con relleno de aluminio particulado, polvo cerámico y minerales. Por su parte, un año antes, Vasconcelos, Lino, Baptista y Neto (2006) hicieron lo mismo con moldes de resina epóxica con distintos rellenos; partículas de aluminio con carbono y partículas de aluminio con vidrio. Ambas investigaciones concluyeron que se puede optimizar las propiedades térmicas y mecánicas de un molde de resina epóxica mediante el reforzamiento con otros materiales particulados para inyección de una serie pequeña de piezas.

### **3.5 Arquitecturas y orientaciones**

En el libro *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications* (2016) los autores, Sohel Rana y Raul Figueiro, explican que los factores que permiten controlar las propiedades del material compuesto son la proporción volumétrica entre fibra y matriz, las propiedades iniciales de cada uno de ellos, la geometría de la fibra y su orientación. Rana y Figueiro plantean que este último factor puede ser de gran utilidad, ya que al orientar las fibras de refuerzo en direcciones específicas se puede obtener distintas propiedades térmicas y mecánicas. De esta forma se crean materiales compuestos anisotrópicos, es decir, materiales cuyas propiedades varían según la dirección.

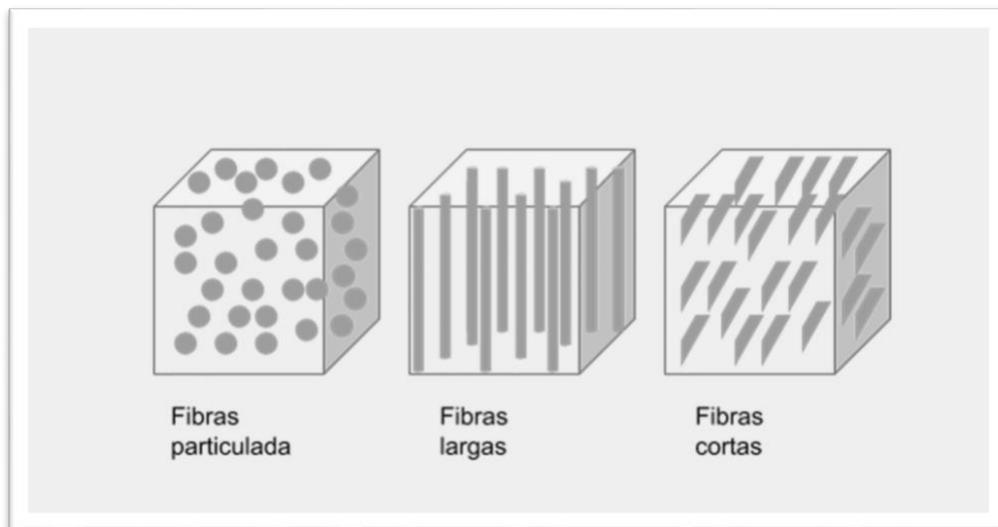


Figura 4. Tipos de fibras de refuerzo y disposiciones en materiales compuestos. Elaboración propia.

En la Figura 4 se muestran los tipos de relleno de refuerzo más comunes usados en materiales compuestos. Últimamente se han conformado ordenamientos y arquitecturas de fibras cada vez más complejas, como geometrías tridimensionales elaboradas mediante trenzado de fibras para aplicaciones específicas, como en la industria automotriz o aeroespacial. Sin embargo, la simulación del comportamiento de estas piezas es una tarea en la que, según Rober Akkerman en su libro *Advances in Composite Manufacturing and Process Design* (2015), todavía queda mucho por mejorar.

### 3.6 Comportamiento de materiales compuestos con fibras largas

Las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos con fibras largas en distintas orientaciones pueden ser descritas por modelación matemática. Particularmente, en este estudio se ocuparán como referencia las ecuaciones de modelamiento de materiales compuestos planteadas en el libro *An Introduction to Composite Materials* de Derek Hull y W. Clyne (1996) complementadas con las ecuaciones del libro *Advanced mechanics of composite materials* de Valery, Vasiliev y Morozov (2007). Para efectos de cálculo, se considerará que las propiedades del cobre de las fibras, y las propiedades de la resina de la matriz son isotrópicas, es decir,

no cambian con la dirección. Ambos se denominan con el subíndice  $f$  (fibra) y  $m$  (matriz) respectivamente, mientras que las propiedades del material compuesto con el subíndice  $c$  (compuesto). Las direcciones axial y transversal se indican con el superíndice 1 y 2 respectivamente.

### 3.6.1 Comportamiento mecánico

#### a) Módulo de Young ( $E$ )

Barry Goodno y James Gere definen el módulo de Young en su libro *Mecánica de los materiales* (2019) como la razón entre el esfuerzo aplicado y a deformación elástica que experimenta un material. En este sentido se trata de una estimación de la elasticidad del material. Esta propiedad varía significativamente en los materiales compuestos según la dirección en la que se aplica el esfuerzo. Existen dos direcciones transversales, y una axial. La dirección axial corresponde a la dirección longitudinal a las fibras, mientras que las direcciones transversales son las perpendiculares a ellas.

#### i) Módulo de Young axial ( $E_C^1$ )

Para determinar el módulo de Young axial se aplicó la regla de mezclas asumiendo que la deformación axial que experimenta el compuesto es igual para la matriz y las fibras. Se toma  $f$  como la proporción volumétrica de fibra en el compuesto.

$$E_C^1 = E_f * f + E_m * (1 - f) \quad (1)$$

#### ii) Módulo de Young transversal ( $E_C^2$ )

Al aplicar esfuerzos de esta manera existen concentraciones de esfuerzos no homogéneas por la circunferencia de las fibras. El modelo que mejor ha descrito este fenómeno para determinar el módulo de Young en la dirección transversal del material

compuesto es el modelo de Halpin Tsai (Hull y Clyne, 1996). Este modelo se resume en las ecuaciones (2), y (3).

$$E_C^2 = \frac{E_m * (1 + \xi * \eta * f)}{(1 - \eta * f)} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right)}{\left(\frac{E_f}{E_m} + 1\right)} \quad (3)$$

$$\xi \approx l$$

b) Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

La relación o coeficiente de Poisson corresponde a la razón entre la deformación transversal y la deformación axial que experimenta un material al aplicarse un esfuerzo en la dirección axial (Goodno & Gere, 2019). Esta propiedad es distinta en la dirección axial y transversal en los materiales compuestos anisotrópicos. El coeficiente se representa de la siguiente forma:

$$\nu^{ij} = -\frac{\varepsilon^j}{\varepsilon^i}$$

El coeficiente de Poisson hace alusión a la deformación resultante en la dirección  $j$ , dado que se ha aplicado un esfuerzo deformante en la dirección  $i$ . Considerando  $\sigma_f^1$  y  $\sigma_m^1$  el esfuerzo axial aplicado a la fibra y a la matriz respectivamente, el procedimiento de cálculo del coeficiente de Poisson para cada dirección es el siguiente:

$$\varepsilon_f^2 = -\nu_f * \varepsilon_f^1 = -\nu_f * \frac{\sigma_f^1}{E_f} \quad (4)$$

$$\varepsilon_m^2 = -\nu_m * \varepsilon_m^1 = -\nu_m * \frac{\sigma_m^1}{E_m} \quad (5)$$

$$\varepsilon^2 = f * (\varepsilon_f^2) + (1 - f) * (\varepsilon_m^2) \quad (6)$$

$$\varepsilon^2 = f * \left( \frac{-\nu_f * \sigma_f^1}{E_f} \right) + (1 - f) * \left( \frac{-\nu_m * \sigma_m^1}{E_m} \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon^2 = f * (-\nu_f * \varepsilon_f^1) + (1 - f) * (-\nu_m * \varepsilon_m^1) \quad (8)$$

Las expresiones anteriores asumen que el material compuesto no está constringido por lo que no hay efectos causados por esfuerzos de reacción. Asumiendo que la deformación axial es la misma tanto en las fibras como en la matriz se tiene:

$$\varepsilon_f^1 = \varepsilon_m^1 = \varepsilon^1 \quad (9)$$

$$\varepsilon^2 = f * (-\nu_f * \varepsilon^1) + (1 - f) * (-\nu_m * \varepsilon^1) \quad (10)$$

Con esto:

$$\nu^{12} = \frac{-\varepsilon^2}{\varepsilon^1} = f * \nu_f + (1 - f) * \nu_m \quad (11)$$

Por otra parte se tiene la siguiente relación Teorema de Maxwell (Hull y Clyne, 1996):

$$\frac{v^{12}}{E_C^1} = \frac{v^{21}}{E_C^2} = \frac{f * v_f + (1 - f) * v_m}{E_f * f + E_m * (1 - f)} \quad (12)$$

$$v^{12} = \sqrt{\frac{E_C^1}{E_C^2}} \quad (13)$$

$$v^{21} = \sqrt{\frac{E_C^2}{E_C^1}} \quad (14)$$

Para el módulo de Poisson en 23, se asume que solo en la dirección 2 se aplica el esfuerzo. Para definir este módulo se consideró el cambio total del volumen ( $\Delta$ ) del material dada una presión hidrostática ( $\sigma_H$ ) y la influencia del módulo de compresibilidad del material ( $K$ ).

$$\Delta = \varepsilon^1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^3 = \frac{\sigma_H}{K}$$

La presión hidrostática es el promedio de las presiones en las tres direcciones, sin embargo en este caso se asume que se aplica presión en sólo en la dirección 2.

$$\sigma_H = \frac{\sigma^1 + \sigma^2 + \sigma^3}{3} = \frac{\sigma^2}{3}$$

$$\varepsilon^3 = \frac{\sigma^2}{K} - \varepsilon^2 - \varepsilon^1$$

$$v^{23} = \frac{-\varepsilon^3}{\varepsilon^2} = -\frac{\sigma^2}{3K\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon^1}{\varepsilon^2} + 1 \quad (15)$$

$$v^{23} = \frac{-\varepsilon^3}{\varepsilon^2} = -\frac{E^2}{3K} - v^{21} + 1 \quad (16)$$

Por otra parte tenemos lo siguiente:

$$K = \left( \frac{f}{K_f} + \frac{(1-f)}{K_m} \right)^{-1} \quad (17)$$

Siendo  $K_f$  el módulo de compresibilidad de la fibra y  $K_m$  es módulo de compresibilidad de la matriz. Estos módulos son determinados con las siguientes expresiones.

$$K_f = \frac{E_f}{3 * (1 - 2 * v_f)} \quad (18)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3 * (1 - 2 * v_m)} \quad (19)$$

$$\frac{v^{23}}{E^2} = \frac{v^{32}}{E^3} \quad (20)$$

Asumiendo que la direcciones transversales 2 y 3 son iguales en sus propiedades, entonces se obtienen los coeficientes de Poisson para todas las direcciones:

$$v^{12}; v^{21}; v^{23}; v^{32}$$

### 3.6.2 Comportamiento térmico

a) Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ )

El coeficiente de dilatación térmica mide el cambio de longitud de un material respecto a su longitud original al aumentar en un grado centígrado su temperatura. En el caso de los materiales compuestos, este coeficiente tiene distinto valor según la dirección que se tome por referencia. Esto quiere decir que para un aumento determinado de la

temperatura del material, la elongación axial podría diferir de la elongación transversal. A continuación se especifican ambas.

i) Dilatación térmica axial ( $\alpha_c^1$ )

Cuando los coeficientes son distintos, y los materiales están sumidos a un mismo cambio de temperatura, entonces habrá uno que experimentará compresión puesto que estará limitado a la expansión del otro material. Generalmente el material limitado es la matriz.

$$\alpha_c^1 \Delta T = \alpha_m \Delta T + \varepsilon_m \quad (21)$$

Nótese que  $\varepsilon_m$  es lo que dejó de expandirse la matriz por estar limitada por las fibras, mientras que  $\varepsilon_f$  es lo que se sobre estiró o expandieron las fibras al estar traccionadas por la expansión de la matriz.

$$\varepsilon_f - \varepsilon_m = \alpha_m \Delta T - \alpha_f \Delta T \quad (22)$$

Se plantea un balance de fuerzas cuando se alcanza el equilibrio en la expansión.

$$(1 - f) * \sigma_m + f * \sigma_f = 0 \quad (23)$$

$$(1 - f) * E_m * \varepsilon_m + f * E_f * \varepsilon_f = 0 \quad (24)$$

Reemplazando se llega a lo siguiente:

$$\varepsilon_m = \frac{-f * E_f * (\alpha_m - \alpha_f)}{(1 - f) * E_m + f * E_f} \quad (25)$$

Con lo cual se obtiene:

$$\alpha_C^1 = \frac{\alpha_m * (1 - f) * E_m + \alpha_f * f * E_f}{(1 - f) * E_m + f * E_f} \quad (26)$$

ii) Dilatación térmica transversal ( $\alpha_C^2$ )

Esta dilatación es más difícil de calcular ya que varían transversalmente. La aproximación de Schapery (2016) es la más aceptada:

$$\alpha_C^2 = \alpha_m * (1 - f) * (1 + \nu_m) + \alpha_f * f * (1 + \nu_f) - \alpha_C^1 * \nu^{12} \quad (27)$$

De esta expresión  $\alpha_C^1$  es obtenido con el procedimiento de cálculo de la dilatación térmica axial, y  $\nu^{12}$  fue obtenido anteriormente por la regla de mezclas:

b) Conductividad térmica ( $k$ )

La conductividad térmica es definida por Mikell Groover en su libro *Fundamentos de la manufactura moderna: Materiales, Procesos y Sistemas* (2007) como la capacidad de transferir calor a través del mismo material mediante el traspaso de energía térmica de molécula a molécula. Al igual que las propiedades anteriores, la conductividad térmica se presenta de manera distinta en materiales compuestos según si la dirección del calor es axial a las fibras, o transversal a ellas.

i) Conductividad térmica transversal ( $k_C^2$ )

Para el cálculo de la conductividad térmica transversal a la fibra se ocupará el modelo de Hatta & Taya. Este modelo consiste en la siguiente ecuación matemática:

$$k_C^2 = k_m + \frac{k_m * (k_f - k_m) * f}{k_m + (1 - f) * (k_f - k_m)/2} \quad (28)$$

En estas fórmulas se tiene que  $k_m$  es la conductividad de la matriz y  $k_f$  es la conductividad de la fibra.

ii) Conductividad térmica axial ( $k_C^1$ )

Para el cálculo de la conductividad axial a la fibra se ocupará el modelo de Thornburg & Pears mejorado por Schuster, Heider, Sharp, y Glowania (2009). Este modelo tiene la particularidad que considera el efecto de la conductividad del material adyacente al material compuesto, y el diámetro y la separación de las fibras.

$$k_C^1 = \xi_{mat} * \xi_{TD} * (k_f * f + k_m(1 - f)) * \delta_1 + k_C^2 * (1 - \delta_1) \quad (29)$$

$$\xi_{mat} = \frac{1}{2} [\tanh(\log(0.1 * k_{mat})) + 1] \quad (30)$$

$$\xi_{TD} = \tanh\left(\frac{\sqrt{\delta_1 * d}}{D}\right) \quad (31)$$

El factor  $k_{mat}$  es la conductividad térmica del material adyacente,  $d$  corresponde al diámetro de la fibra y  $D$  es la distancia entre centro y centro de las fibras. Por otra parte,  $\delta_1$  corresponde a  $f_1/f$ , proporción volumétrica de las fibras en la dirección axial respecto a la proporción volumétrica total de las fibras. En este estudio se presume que el valor de  $\delta_1$  sea muy alto ( $\approx 95\%$ ) ya que se espera que las fibras adquieran una orientación específica; axial o transversal, no una mezcla de ambas.

c) Calor específico ( $C$ )

El calor específico es una propiedad intensiva de cada material, es decir, es un valor fijo que depende únicamente de la sustancia. Esta propiedad corresponde a la cantidad de calor que es capaz de absorber un material hasta elevar su temperatura en un grado centígrado (Groover, 2007). Para el caso del material compuesto que compone el molde se considerará el calor requerido para que el molde en su totalidad aumente su temperatura en un grado. Esto requiere de la cantidad de calor necesaria para que la fibra como la matriz aumenten en un grado su temperatura. Esto obedece a la regla de mezclas usada para otras propiedades anteriormente:

$$C_c = f * C_f + (1 - f) * C_m \quad (32)$$

Esta expresión es igual para cualquier orientación de la fibra, ya que no depende de ella.

### 3.7 Comportamiento de materiales compuestos con refuerzo particulado

Para efectos de esta investigación se requiere determinar las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos isotrópicos de resina epóxica con refuerzo de cobre particulado. Lo anterior, al igual que en compuestos reforzados con fibras largas, puede ser modelado mediante un procedimiento de cálculo matemático el cual se detalla a continuación.

### 3.7.1 Comportamiento mecánico

- Módulo de Young ( $E_c$ ) y coeficiente de Poisson ( $\nu_c$ )

Tanto el módulo de Young como el coeficiente de Poisson pueden ser determinados mediante el método de auto consistencia propuesto por Bernard Budiansky el año 1965 para materiales compuestos reforzado con partículas esféricas . Este método consiste en la evaluación iterativa de las siguientes ecuaciones hasta converger en valores fijos de coeficiente de Poisson y Módulo de Young.

$$G = G_m + \frac{f * G (G_f - G_m)}{G + 2 * (G_f - G) * (4 - 5 * \nu) * \{15 * (1 - \nu)\}^{-1}} \quad (33)$$

$$K = K_m + \frac{f * K (K_f - K_m)}{K + \frac{1}{3} * (K_f - K) * (1 + \nu) * \{1 - \nu\}^{-1}} \quad (34)$$

$$\nu_c = \frac{3K - 2G}{2 * (G + 3K)} \quad (35)$$

$$E_c = \frac{9K}{1 + 3K/G} \quad (36)$$

En estas ecuaciones G, K, E, y  $\nu$  corresponden a los módulo de corte, módulo de compresibilidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson, respectivamente.

### 3.7.2 Comportamiento térmico

- a) Dilatación térmica ( $\alpha_c$ )

Para determinar la dilatación térmica se empleó el modelo propuesto por Tummala y Friedberg el año 1970. Este modelo demostró predecir la dilatación térmica con un mayor nivel de exactitud que los modelos de Thomas, Turner, Kernel y Blackburn (Tummala & Friedberg, 1970). Este modelo considera un factor adimensional ( $A$ ) en la ecuación para determinar la dilatación térmica del compuesto (ecuación 38).

$$A = \frac{(1 + \nu_m)/2E_m}{[(1 + \nu_m)/2E_m] + [(1 - 2\nu_f)/E_f]} \quad (37)$$

$$\alpha_c = \alpha_m - f * A * (\alpha_m - \alpha_f) \quad (38)$$

b) Conductividad térmica ( $k_c$ )

La conductividad térmica de materiales compuestos con refuerzos particulados esféricos es determinada mediante una adaptación del modelo de Maxwell para el cálculo de la conductividad térmica efectiva de materiales compuestos (Xu et al., 2016). Este modelo se resume en la siguiente ecuación.

$$k_c = \frac{2 * k_m + k_f + 2 * f * (k_f - k_m)}{2 * k_m + k_f - f * (k_f - k_m)} * k_m \quad (39)$$

En la ecuación  $k_c$  corresponde a la conductividad térmica del material compuesto,  $k_m$  la conductividad térmica de la matriz o resina, y  $k_f$  la conductividad térmica de las partículas de refuerzo.

### 3.8. Selección de materiales

Para lograr obtener las propiedades que se desean en un material compuesto, en este caso las propiedades del molde, es importante elegir correctamente los materiales que lo componen. Como se indicó anteriormente, un molde debe tener elevada resistencia mecánica a la compresión y adecuadas propiedades térmicas. Específicamente, alta conductividad, y baja dilatación térmica.

La selección de la fibra óptima para la matriz de resina epóxica se justificó mediante el criterio de Ashby (Ashby, 2011). Este criterio compara distintas familias de materiales respecto a dos propiedades determinadas situándolas en un gráfico biaxial. En esta investigación se seleccionaron los materiales según el criterio de Ashby que compara el módulo elástico, con la dilatación térmica y la dilatación térmica con la conductividad térmica de los materiales.

Según lo anterior el cobre es un material que cumpliría con las propiedades buscadas para reforzar la resina epóxica. Conformando así un material muy adecuado para moldes de inyección. Esto debido a que el cobre presenta una conductividad térmica y un módulo de Young significativamente mayor que las resinas epóxicas, manteniéndose una dilatación térmica relativamente cercana entre ambos materiales con una diferencia de que no supera la centena de micrones.

### **3.9. Propiedades y características de la resina epóxica**

Las resinas epóxicas son polímeros que al juntarse con un agente curador o químico determinado reaccionan y forman estructuras tridimensionales con excelentes propiedades mecánicas, térmicas, alta resistencia química, y buena estabilidad. Debido a lo anterior, a su alta resistencia de adhesión y a su buena procesabilidad, las aplicaciones de estas resinas son muy variadas (Díez-Pascual, 2017). Algunos ejemplos de aplicaciones son en adhesivos, revestimientos, encapsulación y matrices para materiales plásticos reforzados con fibras (Wang et al., 2017). A continuación en la Tabla 2 se muestra las principales propiedades de la resina epóxica resistentes a

altas temperaturas obtenidas de la base de datos de materiales de ingeniería MatWeb (MatWeb, 2020).

Tabla 2

*Propiedades de las resinas epóxicas resistentes a altas temperaturas*

Resina epoxi, altas temperaturas	
Densidad ( g/cc)	0.990 - 2.26
Dureza, Rockwell B	67.0 - 96.0
Resistencia última a la tracción (MPa)	13.8 - 89.6
Resistencia a la tracción, rango elástico ( MPa)	1.03 - 2900
Elongación hasta la fractura (%)	0.000 - 50.0
Módulo de elasticidad (GPa)	1.68 - 5.40
El coeficiente de Poisson	0.350 - 0.420
Módulo de corte ( GPa)	1.07 - 5.86
Módulo de compresibilidad (GPa)	5.5
Resistividad eléctrica ( ohm-cm)	400 - 1.00e+16
Temperatura de transición vítrea (°C)	80 - 285
Dilatación térmica ( $C^{-1}$ )	3e-5
Calor específico ( J/kg- C°)	1000
Conductividad térmica (W/m-K)	0.167 - 3.60

*Nota.* En la tabla se muestran los valores de las principales propiedades de las resinas epóxicas resistentes a altas temperaturas. Adaptado de: <http://www.matweb.com/>.

Para efectos de este estudio, se considerarán específicamente las propiedades de la resina CYCOM 977-2 Neat Epoxy Resin de Solvay. Este es un fabricante de todo tipo de materiales con presencia en Chile (Solvay en Chile, s.f), razón por la cual se eligió esta resina para el estudio. Esta resina tiene una temperatura de transición de 212°C, un módulo elástico de 3.52 GPa, y una densidad de 1.31g/cc. Además de esta resina en particular, existen variadas opciones de comerciantes y fabricantes de fácil acceso, que ofrecen resinas epóxicas con alta resistencia térmica y mecánica que pueden ser utilizadas para la construcción de moldes.

### 3.10. Propiedades y características del cobre

Como es caracterizado en el *Base Metal Handbook* (Thomson, 2006), el cobre es un metal de aspecto rojizo, densidad mayor que el aluminio y el hierro. Se destaca por su alta conductividad eléctrica y térmica apenas superada por la plata. Tiene alta ductilidad, buenas propiedades mecánicas, y resistencia a la corrosión. Actualmente su principal uso es en aplicaciones eléctricas como cables, interruptores y semiconductores. (Thompson, 2006). A continuación, la Tabla 3 muestra una tabla las principales propiedades de este material obtenidas de la plataforma MatWeb (MatWeb, 2020).

Tabla 3

*Principales propiedades del cobre*

Cobre	
Densidad ( g/cc)	8.96
Dureza, Rockwell B	37
Resistencia última a la tracción (MPa)	344
Resistencia a la tracción, rango elástico (MPa)	333.4
Elongación hasta la fractura (%)	14
Módulo de elasticidad (GPa)	110

El coeficiente de Poisson	0.364
Módulo de corte (GPa)	46.0
Módulo de compresibilidad (GPa)	110
Resistividad eléctrica (ohm-cm)	1.7e-6
Dilatación térmica ( $C^{-1}$ )	1.7e-5
Calor específico (J/kg-°C)	385
Conductividad térmica( W/m-K)	385

*Nota.* En la tabla se muestran los valores de las principales propiedades del cobre. Adaptado de: <http://www.matweb.com/>.

En particular, en esta investigación se considerará el uso de cobre en forma de fibra larga, de diámetro 0.08 mm, y que puede alcanzar un 99.9% de pureza. El formato de venta es en rollos que permiten una fácil manipulación de la fibra, y que se denominan lana de cobre. Este producto se comercializa por portales accesibles a todo público como Aliexpress (<http://www.aliexpress.com/>), y su precio depende directamente del peso en kilogramos que se requiere comprar.



*Figura 5.* Imagen de carretes de lana de cobre. Recuperado de Aliexpress, 2020, (<http://www.aliexpress.com>)

### 3.11. Relevancia del estudio

En la literatura existen estudios sobre el uso de resina epóxica reforzada para la construcción de moldes de inyección. Muchos de éstos describen el comportamiento mecánico y térmico de estos moldes para distintos rellenos de la resina, como fibra de carbono, aluminio pulverizado y polvos cerámicos, entre otros (Ma et al., 2007; Vasconcelos et al., 2006). Sin embargo, no se ha encontrado un estudio en que el molde sea reforzado con fibras largas en direcciones determinadas, generalmente se trata de materiales particulados o fibras cortas. Esto es debido a que en estos estudios se buscó asegurar la isotropía en las propiedades del molde, es decir, que el material compuesto se comporte de igual manera independiente de la dirección.

Sin embargo, en procesos de inyección se espera que el flujo de calor sea direccionado hacia los canales de refrigeración para ser evacuado a través de ellos. Debido a lo anterior, puede ser de utilidad el diseño de un material de molde anisotrópico a partir de un material compuesto con fibras largas a través de las cuales se conduzca el calor directamente al plano de refrigeración. Esto debido a que el refuerzo de materiales con fibras largas tiene un efecto mayor en el mejoramiento de las propiedades que el refuerzo con partículas o fibras cortas.

En la presente investigación se buscará cubrir esta brecha de conocimiento mediante el estudio de moldes de propiedades anisotrópicas creados mediante materiales compuestos con fibras en orientaciones específicas. En este sentido, se espera determinar si los moldes con fibras largas tienen un mejor desempeño que los moldes de resina epóxica existentes, y cuál de las orientaciones de fibra permite obtener mejores resultados en las piezas finales y mejores tiempos en el proceso. Se espera que la metodología y resultados de este estudio puedan servir de referencia a emprendimientos e interesados en la creación de moldes de inyección eficaces, y de fácil fabricación. Esto con el fin de aportar una mejora a un método de manufactura que facilite el desarrollo y fabricación de productos en Chile a un costo accesible y con materiales de fácil adquisición.

## **4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **4.1. Objetivo**

El objetivo principal de esta investigación es estudiar la eficacia de una serie de moldes para la inyección de una pieza fabricados a partir de un material compuesto de resina epóxica y cobre como fibra de refuerzo. La eficacia será determinada a partir de la medición de la contracción volumétrica y la deflexión máxima de las piezas moldeadas y del tiempo del ciclo de inyección. Determinar la eficacia permite medir la capacidad de un molde de moldear correctamente piezas idénticas al modelo inicial y en un margen de tiempo aceptable según los requisitos y plazos del fabricante. Específicamente, este objetivo se centra en responder las siguientes preguntas:

- a) ¿Añadir cobre tiene un efecto sobre la eficacia del molde de resina epóxica?
- b) ¿Existe una diferencia en la eficacia del molde si el cobre de refuerzo es particulado o como fibras largas?
- c) ¿La orientación en la que se disponen las fibras de cobre influye en esa eficacia?

### **4.2. Hipótesis**

Las hipótesis planteadas buscan responder a las preguntas de investigación en torno a las tres variables de eficacia declaradas. Estas hipótesis son las siguientes:

- a) Un molde de resina epóxica con refuerzo de cobre tendrá un menor tiempo de ciclo, una menor contracción volumétrica de las piezas, y una menor deflexión máxima que un molde de resina epóxica sin cobre.

b) Un molde de resina epóxica reforzado con fibras largas de cobre tendrá un menor tiempo de ciclo, una menor contracción volumétrica de las piezas, y una menor deflexión máxima que un molde de resina epóxica reforzado con cobre particulado.

c) Un molde de resina epóxica con fibras de cobre orientadas según el flujo de calor tendrá un menor tiempo de ciclo, una menor contracción de las piezas y una menor deflexión máxima que un molde de resina epóxica con fibras orientadas transversalmente al flujo de calor.

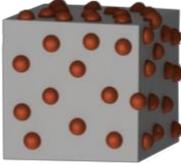
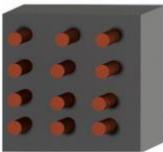
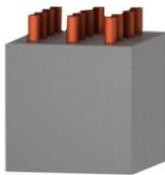
## 5. METODOLOGÍA

El diseño de esta investigación experimental aplicada está enfocado en determinar el tiempo de ciclo de inyección (s), la contracción volumétrica (%), y la deflexión máxima (mm) de una pieza fabricada a partir de tres moldes geoméricamente iguales, pero de materiales distintos. La metodología consta de dos etapas. La primera consiste en un procedimiento de cálculo descriptivo basado en la mecánica y comportamiento térmico de materiales compuestos. En esta primera etapa se busca determinar sus características y propiedades principales. La segunda etapa de la metodología consiste en una simulación experimental de la inyección usando cada uno de estos materiales de molde. Según los resultados de esta segunda etapa se espera determinar cuál de ellos es más eficaz para la construcción de un molde de inyección. En la Tabla 4 se caracterizan los materiales propuestos.

Tabla 4

*Características y composición de los materiales de molde propuestos*

Material de molde	Diagrama	Descripción
-------------------	----------	-------------

M1		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto únicamente por resina epóxica</li> </ul>
M2		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto por resina epóxica y cobre particulado.</li> <li>• Las partículas de cobre son distribuidas de manera homogénea.</li> </ul>
M3		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto por resina epóxica y fibra de cobre.</li> <li>• La fibra se dispone transversal al flujo de calor</li> </ul>
M4		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto por resina epóxica y fibra de cobre.</li> <li>• La fibra se dispone en la misma dirección del flujo de calor.</li> </ul>

Los materiales M1 y M2 son actualmente usados como material de molde para series cortas. El primero sólo contiene resina mientras que el segundo además contiene cobre homogéneamente distribuido en forma de partículas. El objetivo de esta metodología es contrastar la eficacia en la inyección del material de molde M1 y M2 con la eficacia de los nuevos materiales anisotrópicos propuestos, M2 y M3, esto para una misma concentración de cobre en la matriz.

### 5.1. Etapa 1: Cálculo de las propiedades de los materiales de molde

Esta primera etapa consiste en determinar las propiedades del material que constituye cada molde. Estas propiedades son el módulo de Young, la conductividad térmica, la razón de Poisson, la densidad, el calor específico y la dilatación térmica. Para esto se

programó un código en lenguaje abierto *Python* (script) que permite obtener estos parámetros para cada uno de los tres materiales a partir de las propiedades de la resina epóxica y la fibra de cobre. El detalle del *script* se adjunta en Anexos A. El procedimiento de cálculo se basó en las ecuaciones de comportamiento mecánico y térmico de materiales compuestos planteadas en el marco teórico.

Particularmente el programa requiere el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la dilatación térmica, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del cobre y la resina. Además necesita la proporción volumétrica entre esos dos materiales, el tipo de fibra de refuerzo, y la sección transversal de la fibra de cobre.

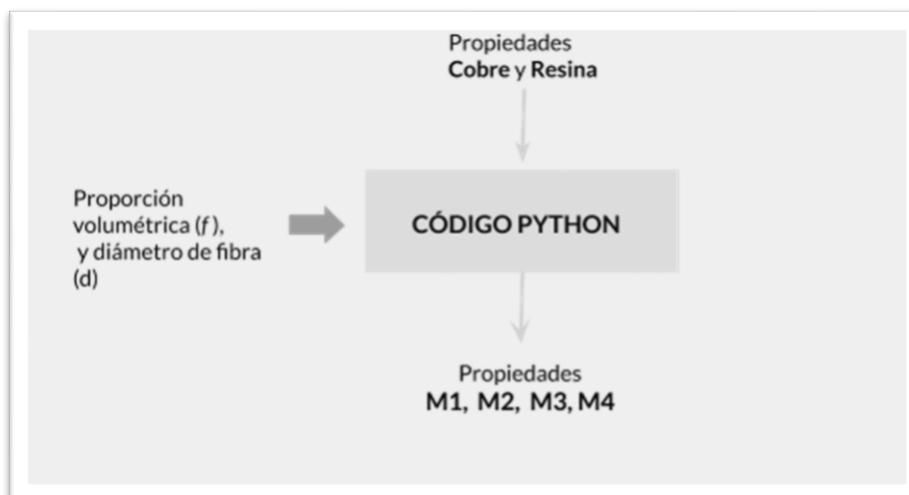


Figura 6. Diagrama del proceso de obtención de las propiedades de los materiales de molde. Elaboración propia.

## 5.2. Etapa 2: Simulación y análisis de la inyección

Esta segunda etapa de la metodología consiste en simular computacionalmente la inyección en un molde de una pieza específica. Primero se modeló esta pieza en Autodesk Inventor®, y luego se diseñó un molde de inyección para ella en Autodesk MoldFlow®. Por último se hicieron cuatro simulaciones de inyección utilizando el

mismo molde, pero con cada uno de los cuatro materiales (M1, M2, M3 y M4). Junto a las simulaciones se realizaron distintos análisis que permitieron obtener el tiempo de ciclo(s), la contracción volumétrica de las piezas (%) para cada material, y la deflexión máxima (mm) .

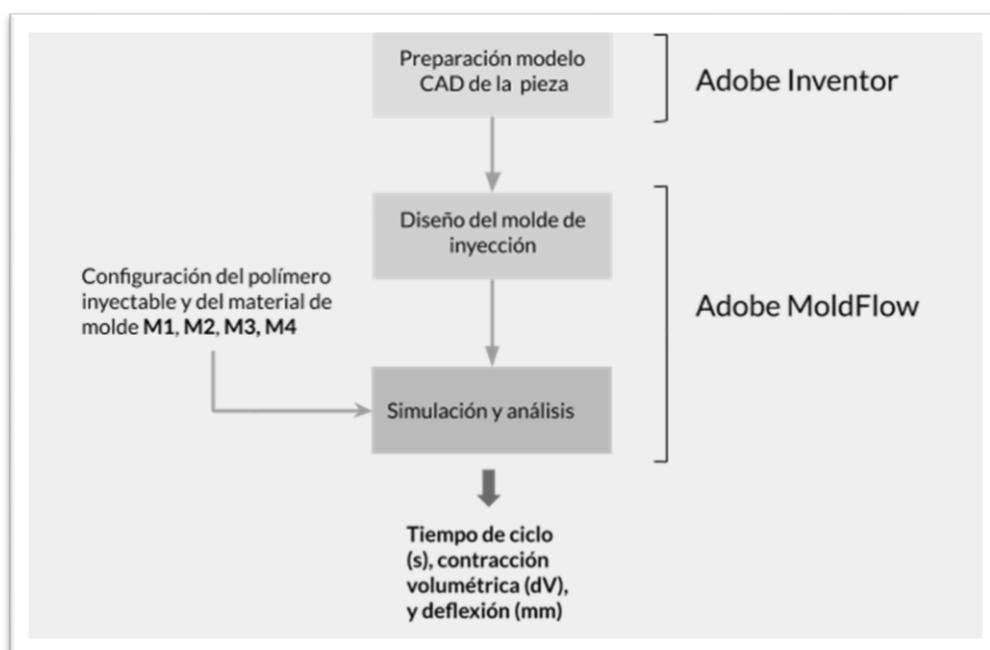


Figura 7. Diagrama del proceso de evaluación de los materiales M1, M2, M3 y M4 mediante la simulación de la inyección de una pieza determinada en el software Autodesk MoldFlow®. Elaboración propia

### 5.2.2 Autodesk Moldflow®

Autodesk Moldflow® es un *software* de Autodesk® que es usado para simular procesos de inyección de piezas plásticas. Moldflow proporciona herramientas para diseñar la cavidad, características, y elegir el material del molde de la pieza. También permite posicionar los puntos de inyección, la entrada y los canales por donde fluye el polímero fundido, además de determinar el sistema de refrigeración, y los parámetros de inyección. Junto con la simulación, el *software* ofrece varios análisis que permiten optimizar el diseño, predecir resultados, identificar defectos de manufactura, y

mejorar el proceso. Para este estudio se emplearán específicamente los análisis de refrigeración, llenado, y deformación.

a) Análisis de refrigeración

El análisis de refrigeración calcula la variación de temperatura y de tiempos de solidificación a lo largo de la pieza, y durante todo el ciclo. Permite determinar partes que no están bien refrigeradas. Dentro de los resultados que arroja este análisis se encuentra el tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión. Esto corresponde al tiempo transcurrido desde que la cavidad se ha llenado completamente hasta que toda la pieza se ha solidificado y está lista para ser extraída. Este tiempo es importante para determinar el tiempo total del ciclo (Autodesk MoldFlow: Resultados del análisis de refrigeración, s.f).

b) Análisis de llenado y compactación

El análisis de llenado permite predecir el flujo del polímero fundido dentro de la cavidad del molde y permite determinar si la pieza se llenará completamente. Esto lo hace calculando un frente de flujo incrementalmente creciente a través de la pieza, desde el punto de inyección. Dentro de los resultados de este análisis, se encuentra el tiempo de llenado, que sumado al tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión constituyen el tiempo de ciclo total. También se obtiene como resultado la contracción volumétrica en la expulsión. Este último corresponde a la disminución de volumen local desde el final de la fase de refrigeración hasta que la pieza se ha enfriado a temperatura ambiente. Este resultado se expresa de manera porcentual (Autodesk MoldFlow: Análisis de llenado + compactación (concepto), s.f).

c) Análisis de deformación

El análisis de deformación permite determinar si la pieza experimentará deformación y contracción, y si es así, determina las principales causas. Dentro de sus resultados se encuentra Deflexión, Contracción diferencial. Este resultado muestra la deformación

máxima de la pieza final como causa de una contracción no uniforme (MoldFlow: Análisis de la deformación (concepto), s.f).

### 5.2.3. Análisis preliminar para distintas concentraciones de cobre y espesor de pared

Para determinar la concentración de cobre óptima de fibra de cobre en la matriz de molde según las características geométricas de la pieza que se desea moldear, se realizó un análisis preliminar. Este análisis consistió en una serie de simulaciones de inyección en siete piezas rectangulares de ancho 7 cm, largo 10 cm y con distintos espesores (2 a 14 mm). Estas simulaciones se realizaron con materiales de molde modelados con fibra horizontal (M3) y vertical (M4), y concentraciones de cobre desde 40% hasta 80%. Junto a la simulación se hicieron análisis de refrigeración, llenado + compactación y deformación. Como resultado se obtuvo la contracción volumétrica, la deflexión máxima y el tiempo de refrigeración de la pieza. Estos resultados se detallan en Anexo B, y a continuación se muestran los gráficos que los resumen:

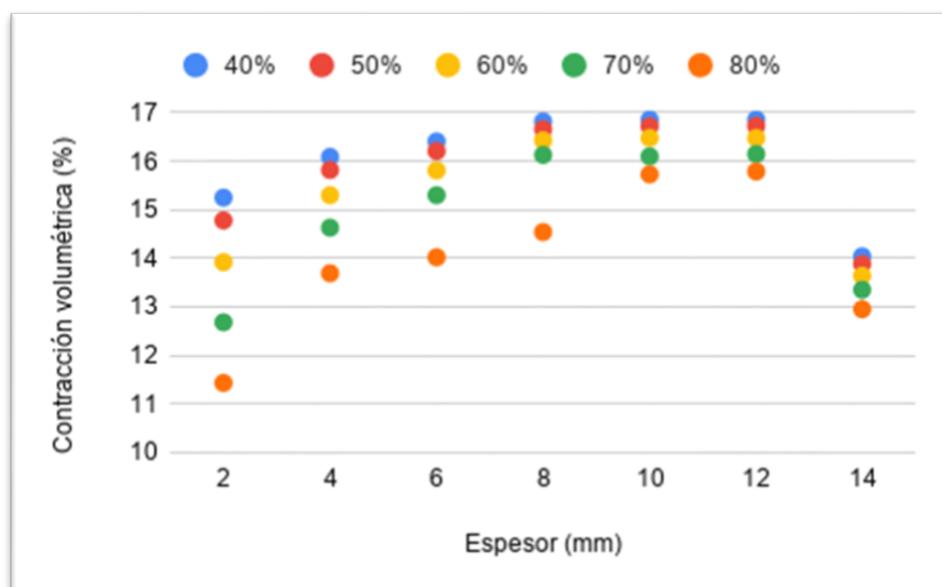


Figura 8. Gráfico de la contracción volumétrica máxima según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras horizontales. Elaboración propia

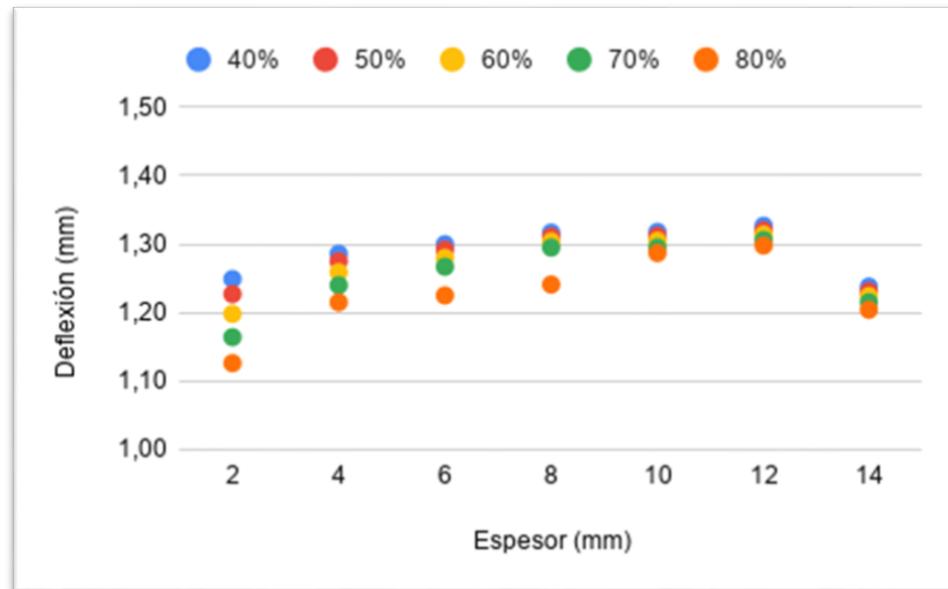


Figura 9. Gráfico de la contracción volumétrica máxima según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras verticales. Elaboración propia

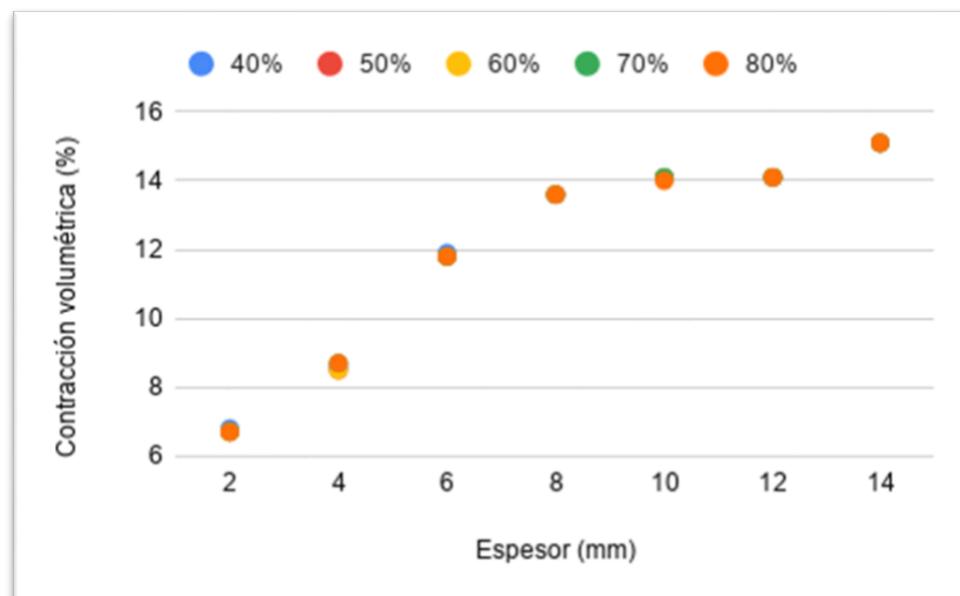


Figura 10. Gráfico de la deflexión por contracción máxima según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras horizontales. Elaboración propia

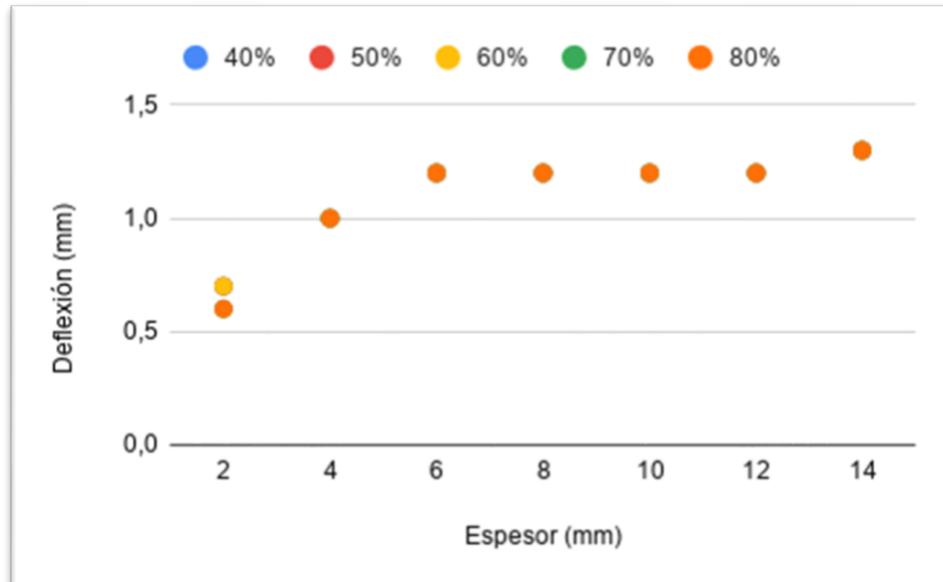


Figura 11. Gráfico de la deflexión por contracción máxima según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras verticales. Elaboración propia

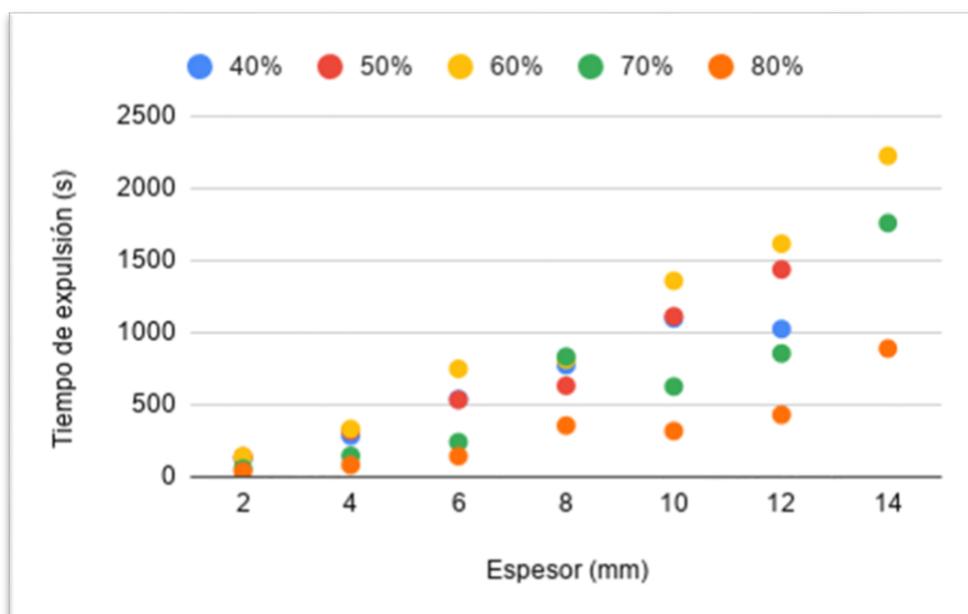


Figura 12. Gráfico de los tiempos de expulsión de la pieza según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras horizontales. Elaboración propia

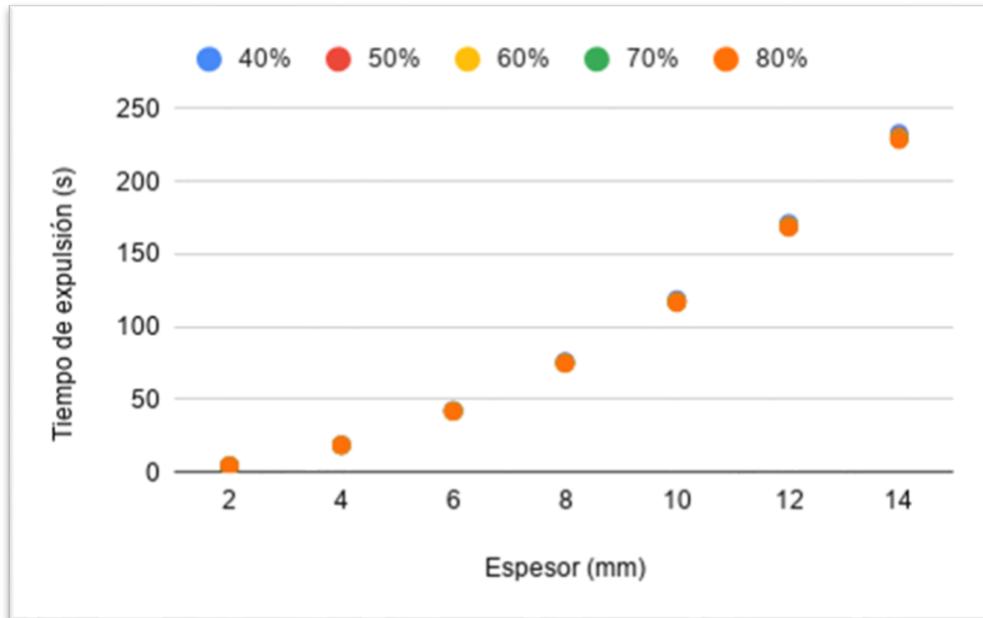


Figura 13. Gráfico de los tiempos de expulsión de la pieza según espesor de la pieza y concentración de cobre en la matriz de molde para fibras verticales. Elaboración propia

Estos resultados son una guía para determinar la concentración de cobre óptima en la matriz del molde según la orientación que se le desea dar a la fibra y el espesor de pared de la pieza a moldear.

#### 5.2.4 Pieza

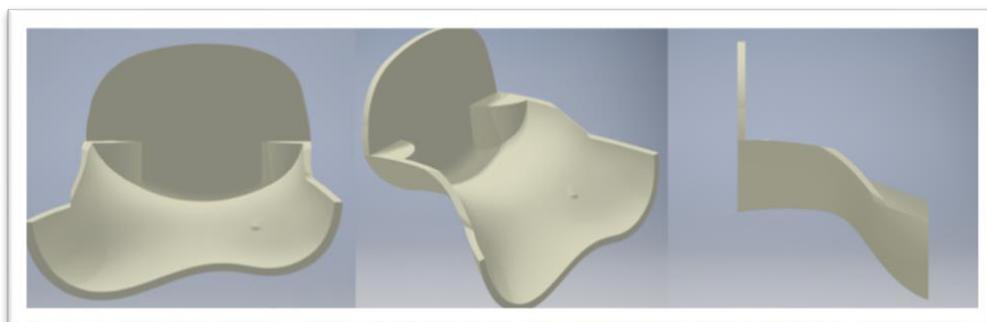
Se eligió una pieza como caso de estudio con el fin de contrastar el rendimiento de los cuatro materiales de molde (M1, M2, M3 y M4), para una concentración óptima de cobre. Esta pieza corresponde a una parte del encapsulamiento plástico de un dispositivo electrónico. Este dispositivo corresponde a un fantoma desarrollado por el emprendimiento SIMULMEDIC donde participan académicos de la Universidad Católica de Chile y se encuentra protegida bajo un *NDA (Non Disclosure Agreement)*. Este dispositivo permite la práctica de punciones venosas periféricas sin tener que disponer de pacientes reales. La Figura 16 muestra una foto del dispositivo y su encapsulamiento plástico.



*Figura 14.* Imagen del dispositivo electrónico del cual se obtuvo la pieza para la simulación de la inyección. Recuperado de Dirección de Transferencia y Desarrollo, Pontificia Universidad Católica de Chile (<https://transferenciaydesarrollo.uc.cl/innovaciones-uc/>).

Este encapsulamiento es en forma de antebrazo y mano en puño, precedidos por una base del mismo material. Para efectos de esta investigación se decidió tomar como caso de estudio la sección superior de la muñeca.

Antes de proceder a modelar los moldes de inyección en Autodesk MoldFlow® se corrigió la geometría de la pieza en Autodesk Inventor® para la simulación. Esto implicó eliminar ángulos rectos e inferiores a 90° dificultando la expulsión de la pieza. Como resultado de estas modificaciones se obtuvo la pieza que se muestra a continuación, y sus características geométricas que se detallan posteriormente en la tabla.



*Figura 15.* Imágenes del modelo 3D de la pieza a moldear en Autodesk Inventor. Elaboración propia.

Tabla 5

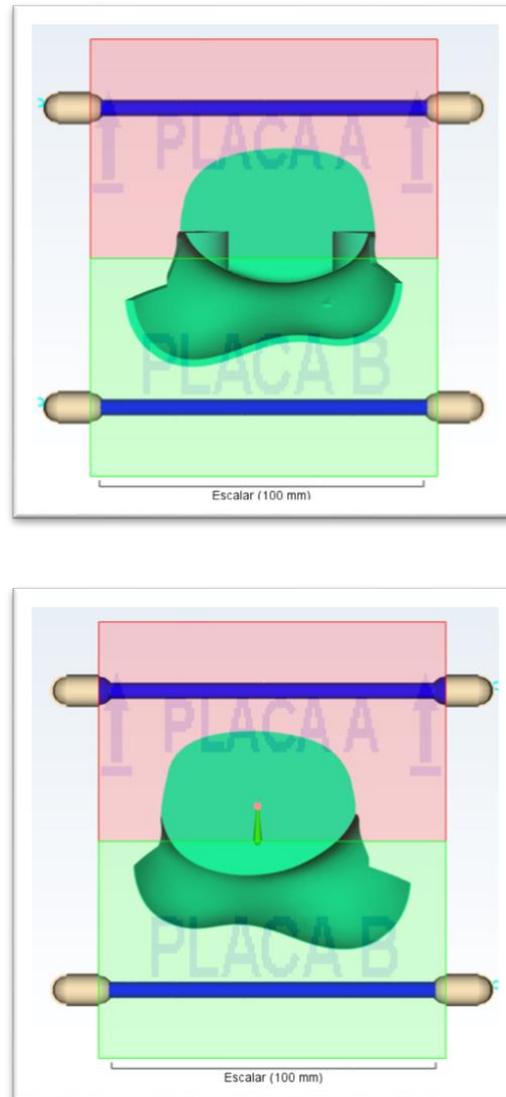
*Características geométricas de la pieza corregida*

Característica	Valor
Alto (cm)	4.5
Ancho (cm)	8.5
Largo (cm)	5.2
Volumen (m <sup>3</sup> )	1.485e-4
Área (m <sup>2</sup> )	1.374e-2
Espesor 1 (cm)	1
Espesor 2 (cm)	0.2

Debido a que el objetivo es construir un molde de inyección minimizando costos y maximizando la eficacia se determinó, por parsimonia, que la concentración óptima de fibra de cobre en la matriz del molde de esta pieza es 70%. Esto debido a que la diferencia respecto a la concentración 80% en la contracción volumétrica, deflexión máxima y tiempo de refrigeración resultante es inferior a un 3%, e implica un menor costo en cobre.

### 5.2.5 Molde de la pieza

El molde fue diseñado en Autodesk MoldFlow® como una sola cavidad con un único punto de inyección. Se determinó el sistema de refrigeración, se configuró geometría del molde y su material para cada simulación. A continuación se muestran sus principales características.



*Figura 16.* Vistas frontal y trasera del molde de la pieza diseñado en Autodesk Moldflow®. En azul se muestran los canales de refrigeración, en verde la cavidad que da forma a la pieza, y en rojo y verde translúcidos se indican el núcleo y la cavidad respectivamente. Elaboración propia.

Tabla 6

*Características del molde de la pieza*

Característica	Valor
Ancho (cm)	10.7
Largo (cm)	6.34
Alto placa superior (cm)	6.79

Alto placa inferior ( <i>cm</i> )	6.73
Número de planos de refrigeración	2
Número de canales de refrigeración	4
Distancia de los canales a la pieza ( <i>cm</i> )	1
Distancia entre canales ( <i>cm</i> )	2.5
Diámetro de los canales ( <i>cm</i> )	0.5

---

El plano de partición fue situado a 3.6 mm del límite inferior de la pieza en su posición frontal, de manera que se permita la abertura del molde sin problemas de atascamiento. Aún así existen otras orientaciones que también logran ese objetivo. Cabe mencionar que la imagen anterior muestra el plano de partición sin considerar la pieza a moldear, lo cual hace que se vean las dos placas del molde como dos bloques rectangulares. En la práctica esto no es así ya que las placas toman la superficie externa de la pieza como límite de separación entre ellas.

El punto de entrada del polímero a la cavidad y su respectivo canal se encuentran en la parte posterior de la pieza, como se muestra en la imagen. Esto con el fin de que el paso del polímero fundido ocurra lejos de los planos de refrigeración, y por ende, no pierda temperatura en el trayecto.

### 5.2.6 Polímero a inyectar

La resina de polímero inyectable con la que se realizaron las simulaciones es PLA (*Polylactid Acid*). En el libro *Polylactic Acid PLA Biopolymer Technology and Applications* (Autor, Año) de la serie de *PDL Handbook*, se describe el PLA como un polímero eco-amigable debido a que es fabricado a partir de fuentes renovables como es el azúcar de caña y el azúcar de maíz. A pesar de ser un polímero en base a fuentes renovables su periodo de degradación puede alcanzar hasta decenas de años, y sus propiedades térmicas lo hacen adecuado para procesos como la inyección por molde (Sin et al, 2012). Se escogió este polímero debido a que su temperatura de inyección es inferior a la temperatura de transición vítrea de la resina epóxica escogida (212°C).

A continuación se muestra una tabla con información detallada sobre el PLA escogido dentro de los materiales disponibles en la biblioteca de Autodesk *Moldflow*.

Tabla 7

*Información del polímero PLA inyectable*

Familia	Miscellaneous
Nombre comercial	ECOLA S-10
Fabricante	Kao Corporation
Abreviatura	PLA
Índice de fluidez ( g/10 min)	5.5
Temperatura de fusión (°C )	150
Temperatura de fluidez (°C )	200
Temperatura de inyección (°C )	195
Densidad masa fundida (g/cm <sup>3</sup> )	1.48

*Nota.* Recuperado de: Autodesk MoldFlow (Versión 2017) [*software*]. Obtenido de: <https://latinoamerica.autodesk.com/>.

### 5.2.7 Otras configuraciones para la simulación

Además de configurar el polímero a inyectar se aseguró de que el refrigerante, la presión máxima, tiempo y la temperatura de inyección, y la secuencia de los análisis sean iguales en todas las simulaciones. Como refrigerante, se escogió agua a 25° C la cual fluye por medio de los canales de enfriamiento. En cuanto a los parámetros del proceso, se estableció la conmutación automática de velocidad y presión de inyección con un límite máximo 180 MPa, y tiempo de inyección de 0.9 segundos. La temperatura de la masa fundida a inyectar es de 195° C por defecto. Y por último la secuencia determinada para los análisis es; 1) Análisis de refrigeración, 2) Análisis de llenado + compactación, y 3) Análisis de deformación.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Resultados de la Etapa 1: Cálculo de las propiedades de los materiales de molde propuestos

De la primera etapa se obtuvieron las siguientes propiedades para cada material de molde propuesto:

Tabla 8

*Propiedades de los materiales de molde obtenidas*

Propiedad	M1	M2	M3	M4
Densidad ( $kg/m^3$ )	2260	6950	6950	6950
Módulo de Young (MPa)	3.5	50.5	17	78
Coefficiente de Poisson	0.36	0.3	0.36	0.36
Conductividad térmica ( W/m -K)	1.5	11.6	8.3	89.3
Calor específico (J/kg -°C)	1000	569.5	569.5	569.5
Dilatación térmica ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$3exp^{-5}$	$2.09exp^{-5}$	$2.22exp^{-5}$	$1.71exp^{-5}$

Se puede notar que M4 tiene una conductividad térmica 11 veces mayor que M3 y casi 8 veces mayor que M2. Ocurre algo similar con el módulo de Young, ya que M4 presenta un valor que supera en más de 5 veces el módulo de Young de M3, y en casi 15 MPa el módulo de Young de M2. Tanto la densidad como el calor específico obedecen a la regla de mezclas, por lo que M2, M3 y M4 presentan los mismos valores ya que tienen la misma proporción de cobre y resina. M1 es el material que presenta menor conductividad térmica y menor módulo de Young, además es el material que tiene menor densidad, mayor calor específico y dilatación térmica.

## 6.2. Resultados de la Etapa 2: Simulación y análisis de la inyección

Los resultados de las simulaciones realizadas en la segunda etapa de la metodología de investigación planteada se resumen en la Tabla 8.

Tabla 9

*Resultados de la inyección para cada material de molde usado*

	M1	M2	M3	M4
Tiempo de llenado (s)	0.9	0.9	0.9	0.9
Tiempo hasta alcanzar temperatura de expulsión (s)	12.3	3.2	3.6	2.4
Tiempo de ciclo (s)	13.2	4.1	4.5	3.1
Contracción volumétrica (%)	7.5	5.5	5.4	5.6
Deflexión por contracción (mm)	0.7	0.67	0.67	0.67

Según estos resultados, el material de molde más eficaz según los parámetros de contracción, deflexión y tiempo de ciclo es el material M4. Esto ya que presenta el menor tiempo de ciclo, y de las menores contracciones volumétricas y deflexión por contracción. El segundo material de molde con mejores resultados es M2, el cual sólo difiere en el tiempo de ciclo con M4, y esta diferencia es de menos de un segundo. En este sentido el desempeño de ambos materiales, M2 y M4, es muy similar en este caso de estudio.

El material M1 es el que posee el mayor tiempo de ciclo (13.2 s) y la diferencia es significativamente mayor al tiempo de ciclo de los materiales M2, M3 y M4. También este material reportó la mayor contracción volumétrica (7.5%), y la mayor deflexión por contracción junto al material M3 (0,7mm).

La máxima diferencia en deflexión por contracción entre los distintos materiales es de 0.03 milímetros. Esta diferencia es muy pequeña, ya que los valores son muy cercanos,

por lo que se puede decir que esta variable deflexión por contracción es independiente del tipo de material de molde.

En cuanto a la contracción volumétrica la máxima diferencia es de dos puntos porcentuales. Esta diferencia se da entre el material M1 y el resto de los materiales. Por último el tiempo de ciclo es la variable que mostró más variabilidad según el tipo de material de molde que se emplea. Esta diferencia alcanzó los 10 segundos entre los materiales M1 y M4, 8.7 segundos entre los materiales M1 y M3, y 9 segundos entre los materiales M1 y M2.

### **6.3. Análisis de perturbación**

Las propiedades de los materiales que componen los materiales de molde propuestos, cobre y resina, fueron obtenidas usando criterios de la literatura científica y no medidas experimentalmente. Lo anterior podría llevar a errores y que los resultados obtenidos de las simulaciones no sean exactamente los que se obtendrían en la realidad. Es por esto que se realizó un análisis de perturbación en el que se plantean cuatro escenarios distintos. En ellos se supuso que las propiedades del cobre o la resina, específicamente módulo de Young o conductividad térmica, son un 15% inferior a los valores obtenidos en la literatura.

Para cada escenario se modelaron nuevamente los materiales de molde M1, M2, M3 y M4 y se realizaron las simulaciones de inyección para la pieza de caso de estudio. El objetivo de este análisis es determinar si existe una diferencia significativa en la eficacia de los materiales de molde si las propiedades del cobre o de la resina disminuyen un 15%, manteniendo la concentración de cobre constante en 70%. La Tabla 9 muestra el valor del módulo de Young y la conductividad térmica del cobre y la resina en cada uno de los escenarios.

Tabla 10

*Módulo de Young y conductividad térmica del cobre y la resina para cada escenario*

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Módulo de Young cobre ( $GPa$ )	93.5	110	110	110
Conductividad térmica cobre ( $W/m \cdot K$ )	385	327.5	385	385
Módulo de Young resina ( $GPa$ )	3.52	3.52	2.99	3.52
Conductividad térmica resina ( $W/m \cdot K$ )	1.5	1.5	1.5	1.275

Los resultados de las simulaciones para cada escenario y material de molde se muestran a continuación en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21.

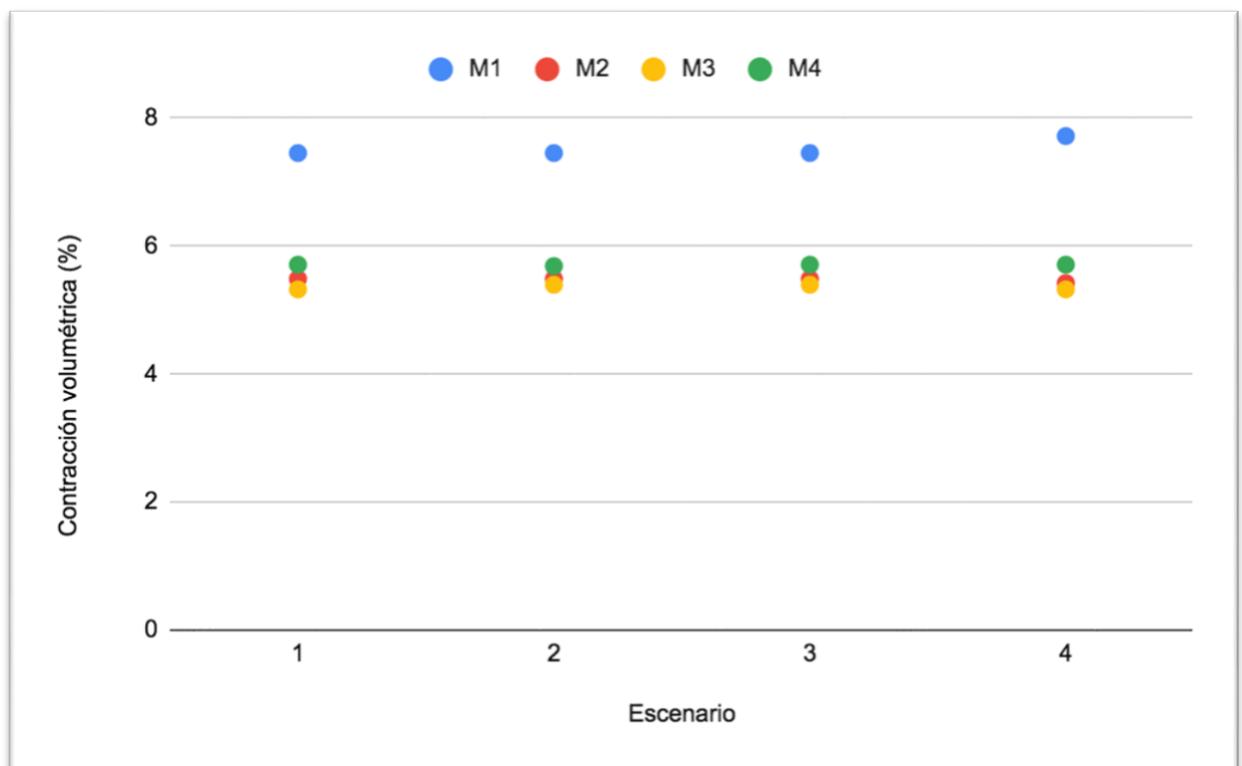


Figura 17. Gráfico de la contracción volumétrica de la pieza según material de molde y según el escenario supuesto. Elaboración propia.

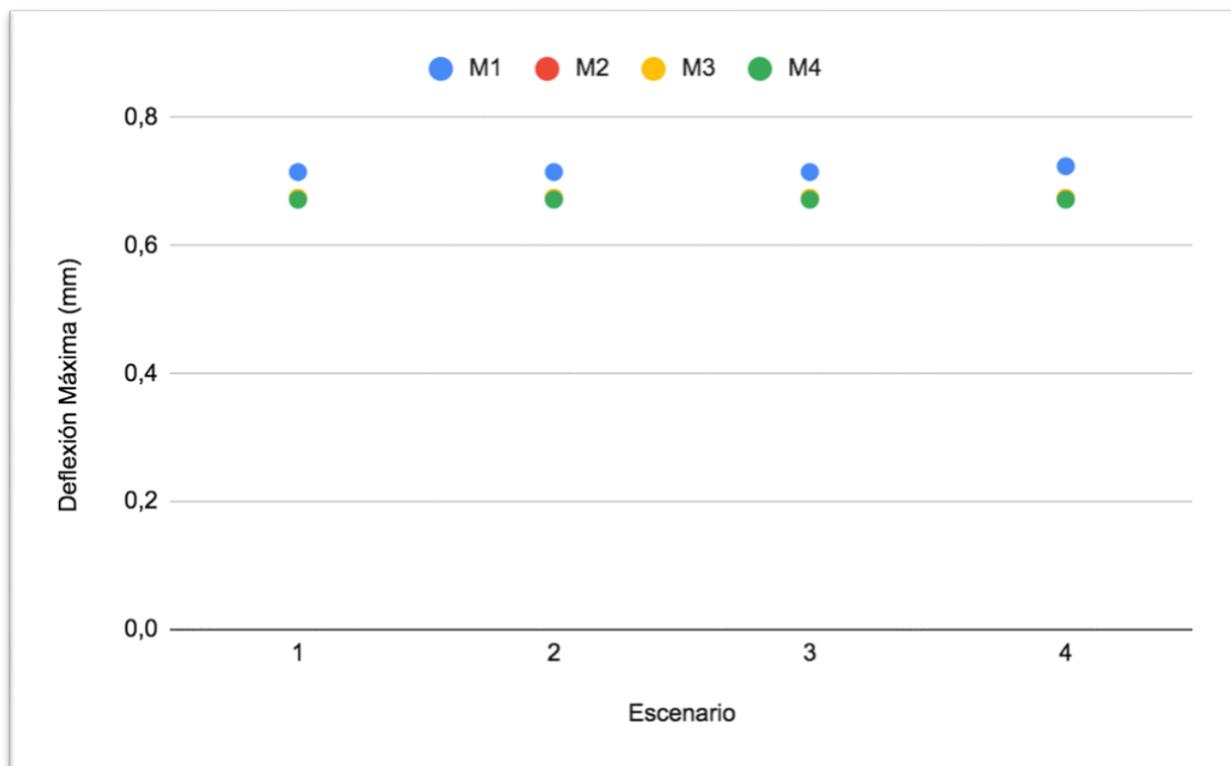


Figura 18. Gráfico de la deflexión máxima en la pieza según material de molde y según el escenario supuesto. Elaboración propia.

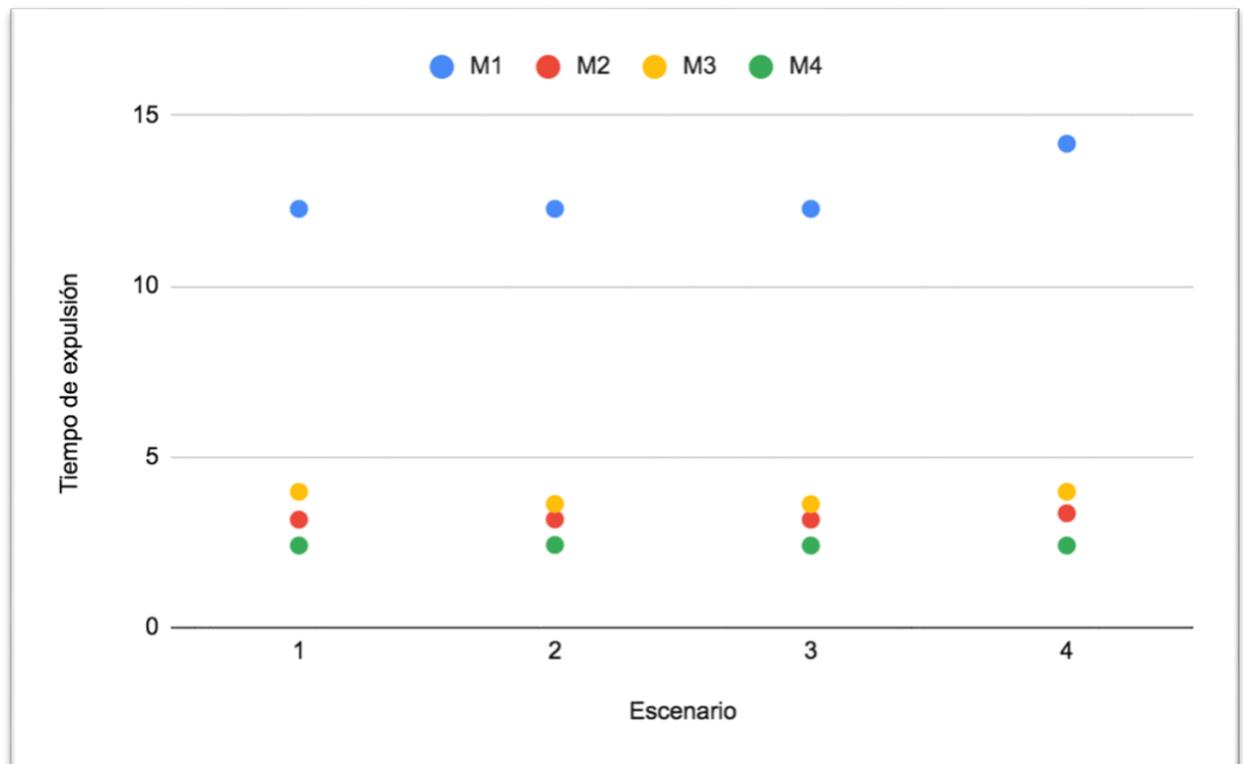


Figura 19. Gráfico del tiempo de refrigeración según material de molde y según el escenario supuesto. Elaboración propia.

De la Figura 19 se puede ver que la contracción volumétrica aumenta ligeramente para el material M1 en el escenario 4. Esto quiere decir que una reducción de un 15% en la conductividad térmica de la resina puede resultar en un aumento de la contracción de la pieza final. El resto de los casos no se ven diferencias significativas.

La deflexión máxima no se vio alterada ante una reducción de la conductividad térmica y/o módulo de Young. Esta variable se mantuvo constante independiente del material de molde y del escenario. Por último, respecto a los tiempos de ciclo se puede notar que la mayor diferencia ocurre nuevamente en el escenario 4 para el material de molde M1. Una disminución de un 15% de la conductividad térmica de la resina resultó en un aumento de dos segundos del tiempo de refrigeración al usar material de molde M1.

Los materiales M1, M2 y M3 tuvieron un comportamiento constante independiente del escenario. Esto quiere decir que una disminución de un 15% en la conductividad térmica o módulo de Young del cobre o la resina no afecta significativamente los resultados de la inyección.

## **7. CONCLUSIONES**

En el presente estudio se determinó el efecto en los resultados de un proceso de inyección al incluir fibras de cobre en un molde de resina epóxica, y también el efecto agregado que tiene la orientación de las fibras. Esto se logró mediante un procedimiento de cálculo de materiales compuestos seguido por una simulación de inyección en el *software* Autodesk MoldFlow®.

De los resultados se puede deducir que tanto el tiempo de ciclo, y la contracción volumétrica mejoran al incluir un 70% de cobre en la matriz de resina epóxica del molde de inyección. Sin embargo, la deflexión por contracción se mantiene constante independiente del tipo de material de molde usado.

La orientación de las fibras es un factor que afecta considerablemente el tiempo de ciclo y la contracción volumétrica de las piezas finales. La eficacia del material de molde con fibras en la misma dirección del flujo de calor es superior a la eficacia del material de molde con fibras dispuestas transversalmente, y mayor a la eficacia del material de molde con refuerzo particulado. Por su parte, se obtuvo mejores resultados en el proceso de inyección al usar material de molde con refuerzo particulado que con fibras transversales al flujo de calor.

Es importante considerar que fabricar un molde de resina epóxica asegurando que las fibras queden orientadas verticalmente (en la dirección del flujo de calor) puede ser más difícil que orientarlas horizontalmente. Por lo tanto, el interesado debe decidir la orientación que dará a las fibras según si su prioridad es obtener un menor tiempo de ciclo y contracción volumétrica en las piezas finales, o la facilidad de construcción del molde de inyección.

Los resultados de esta investigación son un primer entendimiento de las mejoras en el proceso de inyección que se obtienen al reforzar un molde de resina epóxica con partículas o fibras en determinadas orientaciones. De esta forma, se proporciona un caso de simulación de inyección. Este sirve como referencia para que emprendimientos o interesados que deseen fabricar un producto mediante inyección de plástico, puedan considerar el uso de un molde de resina epóxica reforzado para no incurrir en complicados y costosos métodos de manufactura del molde (que usualmente sería de metal) para unas primeras series.

## **8. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Una de las principales limitaciones de este estudio es que los resultados de la inyección dependen en gran medida de la geometría de la pieza moldeada. Es por esto que no es posible generalizar la obtención de el mismo efecto de los materiales de molde para cualquier geometría. Este es el análisis de sólo un caso, pero entrega la metodología para realizar una simulación que permita evaluar el uso de la resina epóxica para un molde de series cortas.

Factores como el espesor de pared, y la dirección en la que se proyectan las superficies de una pieza pueden afectar significativamente en el tiempo de ciclo, la contracción volumétrica y la deflexión máxima. Es por esto que se recomienda estudiar cada pieza con el fin de determinar para ella las características del material de molde óptimo.

Por último, es importante tomar en cuenta que este estudio se basó en principios teóricos de cálculo y en simulaciones, por lo tanto se requiere corroborar los resultados obtenidos de manera empírica y en la práctica. Esto permitiría entender el efecto real y la verdadera utilidad de la inclusión de fibra cobre y su orientación en la matriz de un molde.

Como próximos pasos se sugiere ahondar en el efecto de la anisotropía diseñando moldes en que la disposición y concentración de las fibras de cobre se adapten a las

características locales de las piezas a moldear. Esto permitiría controlar las diferencias de contracción y tiempos de solidificación en una misma pieza, y minimizar la deflexión máxima sin tener que incurrir en los complicados sistemas de canales de refrigeración que se utilizan actualmente.

## REFERENCIAS

Akkerman, R. (2015). *Advances in composites manufacturing and process design* (Woodhead Publishing series in composites science and engineering; Number 56)

*American Society for Metals. Handbook Committee. (1985). Metals handbook (9a. ed.). Metals Park, Ohio: American Society for Metals.*

Análisis de llenado + compactación (concepto). (s.f). Recuperado el 16 de Septiembre, 2020, de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ESP/MoldflowAdvisor/files/GUID-C1D0DF67-F54F-4819-B56D-44E81CAADD6B-htm.html>

Análisis de la deformación (concepto). (s.f). Recuperado el 16 de Septiembre, 2020, de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/MoldflowAdvisor-Analyses/files/GUID-3773ADC7-C0B6-4995-968B-6DC7F8249998-htm.html>

Ashby, K., Johnson, M., & Johnson, Kara. (2014). *Materials and design : The art and science of material selection in product design* (3a ed.). Amsterdam: Elsevier.

Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design, fourth edition* (4th ed.). Burlington, Mass: Elsevier.

Bernard, H. R. (2006). *Research methods in anthropology: Qualitative and quantitative approaches*. Lanham, MD: AltaMira Press.

Chawla, N, & Shen, Y.. (2001). Mechanical Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites. *Advanced Engineering Materials*, 3(6), 357-370.

Chemical Rubber Company. (1978). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*.

Denzin, N. K. (2012). Triangulation 2.0. *Journal of Mixed Methods Research*, 6(2), 80-88.

Diez-Pascual, A. (2017). Mechanical properties of epoxy/thermoplastic blends. *En Handbook of Epoxy blends. Springer International Publishing*, (6) 743-774.

Folgado, R, Peças, P, & Henriques, E. (2010). Life cycle cost for technology selection: A Case study in the manufacturing of injection moulds. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 368-378.

Godoy, C., & Ortega, C. (2012). Antecedentes y pautas para importar y exportar desde y hacia China (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Goodno, B. J., & Gere, J. M. (2019). *Mecánica de materiales* (9a. ed.). Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com>

Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna : Materiales, procesos y sistemas* (3a. ed.). México: McGraw Hill.

Hassan, H. (2012). An experimental work on the effect of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4), 675-686.

Hull, D., & Clyne, T. (1996). *An introduction to composite materials* (2a ed., Cambridge solid state science series).

Karania, R., Kazmer, D., & Roser, C. (2004). Plastics Product and Process Design Strategies. *Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volumen 3a: 8va Design for Manufacturing Conference*. Salt Lake City, Utah, USA. Septiembre 28–Octubre 2, 2004. pp. 703-712. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2004-57755>

Kovács, József Gábor, Szabó, Ferenc, Kovács, Norbert Krisztián, Suplicz, András, Zink, Béla, Tábi, Tamás, & Hargitai, Hajnalka. (2015). Thermal simulations and measurements for rapid tool inserts in injection molding applications. *Applied Thermal Engineering*, 85, 44-51.

Kuo, C. (2012). A Simple and Cost-Effective Method for Fabricating Epoxy-Based Composite Mold Inserts. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(4), 383-388.

Lin, W., Zhang, Y., & Wang, H. (2019). Thermal conductivity of unidirectional composites consisting of randomly dispersed glass fibers and temperature-dependent polyethylene matrix, *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 412-422.

MatWeb. (s.f). Recuperado en el 16 de Septiembre, 2020, de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1980eb23287a4408adc404dd39293942>

Montilla, E.(2006). Diseño y evaluación de moldes para inyección de plásticos utilizando materiales de uso común combinados con resinas epóxicas (tesis). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.

Nielsen, L. (1974). The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 13(1), 17-20.

Ozcelik, Babur, Ozbay, Alper, & Demirbas, Erhan. (2010). Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), 1359-1365.

Pouzada, A. (2009). Hybrid moulds: A case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(4), 195-202.

Prashanth Reddy, K., & Panitapu, B. (2017). High thermal conductivity mould insert materials for cooling time reduction in thermoplastic injection moulds. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 519-526.

*Plastic Molding Processes*. (2015). McGraw-Hill.

Rees, Herbert. (2001). *Understanding Injection Mold Design*. Hanser Publishers. Recuperado de : <https://app.knovel.com>

Resultados del análisis de refrigeración. (s.f). Recuperado el 16 de Septiembre, 2020, de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ESP/MoldflowAdvisor/files/GUID-077521D7-6F22-4445-8EA7-E010A182E094-htm.html>

Schapery, R. (2016). Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials Based on Energy Principles. *Journal of Composite Materials*, 2(3), 380-404.

Strauss, A. (1987). *Qualitative analysis for social scientists*. Cambridge, Mass: Cambridge University Press.

Strauss, A., & Corbin, J. (1990). *Basics of qualitative research : Grounded theory procedures and techniques*. Newbury Park, Calif: SAGE.

Solvay en Chile. (s.f Recuperado el 16 de Septiembre, 2020, de <https://www.solvay.com/es/chile>

Thompson, M. (2006). *Base Metals Handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

Vasconcelos, P., Lino, F., Baptista, A., & Neto, R. (2006). Tribological behaviour of epoxy based composites for rapid tooling. *Wear*, 260(1), 30-39.

Vasiliev, V., & Morozov, E. (2007). *Advanced mechanics of composite materials* (2a ed.). Amsterdam ; London: Elsevier.

Wang, H., Ruan, X., & Zhou, X. (2003). Research on Injection Mould Intelligent Cost Estimation System and Key Technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(3), 215-222.

Wang, J., Liu, R., & Jian, X. (2017). Introduction to epoxy/thermoplastic blends. *En Handbook of Epoxy blends*. Springer International Publishing , (6) 429-458.

Xu, J.Z, Gao, B.Z, & Kang, F.Y. (2016). A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials. *Applied Thermal Engineering*, 102, 972-979

Yi, X. S., Du, S., & Zhang, L. (2017). An Introduction to Composite Materials. *Composite materials engineering 1*, 1- 61.

**ANEXOS**

## ANEXO A: SCRIPT DEL CÓDIGO PYTHON

```

"""Propiedades de los materiales primarios (cobre y resina)"""

import math

Ef=110     #####GPa
Em=3.52    #####GPa
vf=0.364
vm= 0.36

kf=385     #####conductividad fibra
km=1.5     #####conductividad resina
ka=50.2    #####conductividad acero
df= 8960   #####kg/m3
dm= 2260   #####kg/m3
caf=0.00017 #####C-1
cam= 0.0003 #####C-1
cf=385
cm=1000

f=0.7     #####Proporcion volumetrica cobre/resina
d=0.00008 ##### m
delta1=0.95

D=math.pi*d/(4*f)
Bm=Em/(3*(1-2*vm))   #####GPa Módulo de Compresibilidad
Bf=Ef/(3*(1-2*vf))   #####GPa Módulo de Compresibilidad cambió**
Gm=Em/(2*(1+vm))    #####GPa Módulo de Corte
Gf=Ef/(2*(1+vf))    #####GPa Módulo de Corte
vp=float(0.305) c##### Obtenido por iteracion de auto consistencia

"""Módulo de Young Axial"""

Ec1=Ef*f+Em*(1-f)
print ("Módulo de Young Axial:"+str(Ec1))

"""Módulo de Young Transversal"""

n=(Ef/Em-1)/(Ef/Em+1)
Ec2=Em*(1+n*f)/(1-n*f)
print ("Módulo de Young Transversal:"+str(Ec2))

"""Módulo de Young Particulados"""

import sympy as sy

```

```

G = sy.Symbol('G')
B = sy.Symbol('B')
B_val=sy.solve(Bm + f*B*(Bf-Bm)/(B+(1/3)*(Bf-B)*(1+vp)*(1-vp)**(-1))-B,B)
print(B_val)
G_val=sy.solve(Gm + f*G*(Gf-Gm)/(G+2*(Gf-G)*(4-5*vp)*(15*(1-vp)**(-1))-G,G)
print(G_val)
vr=(3*B_val[1]-2*G_val[1])/(2*(G_val[1]+3*B_val[1]))
print('Poisson:'+str(vr))
Ep=9*B_val[1]/(1+3*B_val[1]/G_val[1])
print('Módulo de Young Particulado:'+str(Ep))

""""Coeficiente de Poisson Axial (v12)""""

v12=f*vf+(1-f)*vm
print ("Coeficiente de Poisson Axial:"+str(v12))

""""Coeficiente de Poisson Transversal (v21)""""

v21=v12*Ec2/Ec1
print ("Coeficiente de Poisson Axial:"+str(v21))

""""Coeficiente de Poisson Particulado""""

print ("Coeficiente de Poisson Particulado:"+str(vp))

""""Dilatación térmica axial""""

ca1=(cam*(1-f)*Em+caf*f*Ef)/((1-f)*Em+f*Ef)
print ("Dilatación térmica axial:"+str(ca1))

""""Dilatación térmica transversal""""

ca2=cam*(1-f)*(1+vm)+caf*f*(1+vf)-ca1*v12
print ("Dilatación térmica transversal:"+str(ca2))

""""Dilatación térmica particulado""""

A=((1+vm)/2*Em)/((1+vm)/2*Em+(1-2*vf)/Ef)
ca3=cam-f*A*(cam-caf)
print(ca3)

""""Conductividad Térmica Transversal""""

k2=km+(km*(kf-km)*f)/(km+(1-f)*(kf-km)/2)
print ("Conductividad térmica transversal:"+str(k2))

```

```

"""Conductividad Térmica Axial"""

import math
etham=(1/2)*math.tanh(math.log(0.1*ka)+1)
ethad=math.tanh(math.sqrt(delta1)*d/D)
k1=k2*(1-delta1)+delta1*(etham*ethad*(kf*f+km*(1-f)))
print ("Conductividad térmica axial:"+str(k1))

"""Conductividad Térmica Particulado"""

k3=(2*km+kf+2*f*(kf-km))*km/(2*km+kf-f*(kf-km))
print ("Conductividad térmica particulado:"+str(k3))

"""Calor específico"""

c=f*cf+(1-f)*cm
print("Calor específico: "+str(c))

"""Densidad del material"""

den=f*df+(1-f)*dm
print( "Densidad:"+str(den))

```

## ANEXO B: RESULTADOS TABULADOS DEL ANÁLISIS PRELIMINAR

### i) Resultados obtenidos en material de molde con fibras de cobre orientadas según el flujo de calor

Contracción volumétrica	Concentración de cobre				
	40%	50%	60%	70%	80%
Espesor (mm)					
2	6.8	6.7	6.7	6.7	6.7
4	8.6	8.5	8.5	8.7	8.7

6	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8
8	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
10	14.1	14.1	14.1	14.1	14.0
12	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1
14	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1

<b>Deflexión máxima</b>					
Concentración de cobre					
Espesor (mm)	40%	50%	60%	70%	80%
2	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
8	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
10	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
12	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
14	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

<b>Tiempo de Expulsión</b>					
Concentración de cobre					
Espesor (mm)	40%	50%	60%	70%	80%
2	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5
4	18.9	18.7	18.7	18.6	18.6
6	42.7	42.4	42.2	42.0	41.9
8	76.2	75.6	75.2	75.0	74.8
10	118.8	117.8	117.2	116.8	116.5
12	171.1	169.7	169.1	168.6	168.2

14	232.9	230.9	229.7	229.0	228.4
----	-------	-------	-------	-------	-------

**ii) Resultados obtenidos en material de molde con fibras de cobre orientadas transversalmente al flujo de calor**

<b>Contracción volumétrica</b>					
	Concentración de cobre				
Espesor (mm)	40%	50%	60%	70%	80%
2	15.25	14.78	13.92	12.68	11.43
4	16.09	15.82	15.3	14.63	13.69
6	16.41	16.21	15.81	15.3	14.02
8	16.82	16.66	16.43	16.13	14.54
10	16.86	16.72	16.48	16.1	15.73
12	16.86	16.73	16.48	16.15	15.79
14	14.04	13.88	13.64	13.35	12.95

<b>Deflexión máxima</b>					
	Concentración de cobre				
Espesor (mm)	40%	50%	60%	70%	80%
2	1.24	1.22	1.19	1.16	1.12
4	1.28	1.27	1.25	1.24	1.21
6	1.3	1.29	1.28	1.26	1.22
8	1.31	1.31	1.30	1.29	1.24
10	1.31	1.31	1.30	1.29	1.28

12	1.32	1.32	1.31	1.30	1.29
14	1.23	1.23	1.22	1.21	1.2

Tiempo de Expulsión	Concentración de cobre				
	40%	50%	60%	70%	80%
Espeor (mm)					
2	120.7	133	137	51.21	32.13
4	279.5	315.7	327.6	140.8	76.52
6	534.4	529.6	744.9	235.8	137.8
8	770.1	627.5	809.7	829.5	350.9
10	1094.2	1109.9	1356.2	621.8	313.1
12	1021.5	1434.9	1613.9	851.9	425.7
14	-	1598.7	2223.8	1757.2	885.8