TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

ADECUACIÓN DE MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D POR HILO CALIENTE PARA USOS DE MATERIALES COMPUESTOS

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

PRESENTA:

ELIASIN ALEJANDRO ALBORES MONTOYA

ASESOR INTERNO:

M.C. IGNACIO ARRIOJA CÁRDENAS

ASESOR EXTERNO:

DR. JOSÉ MARÍA RODRÍGUEZ LELIS

NOMBRE DE LA INSTANCIA:

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. *DICIEMBRE DE 2017.*

ÍNDICE

JUSTIFICACIÓN 6

OBJETIVOS 7

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7

PROBLEMAS A RESOLVER 7

CAPÍTULO UNO ▪ INTRODUCCIÓN 11

1.1 ESTADO DEL ARTE Y TEORÍA BÁSICA 11

1.1.1 LA IMPRESORA ROBO 3D R1 12

1.1.1.1 Extrusor 13

1.1.2 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN 15

1.1.2.1 Modelado del mecanismo de alimentación 15

1.1.2.2 Comportamiento reológico del material fundido 17

1.1.2.3 Dinámica del material fundido a través del elemento de fundición. 18

1.1.3 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) 21

1.1.4 MATERIALES COMPUESTOS 22

1.1.4.1 Refuerzo por partículas o inclusiones 23

1.1.4.2 Nanotubos de carbono 24

1.1.4.3 Diamante sintético 26

1.1.4.4 Propiedades de los materiales compuestos 27

1.1.5 REOLOGÍA DE SISTEMAS MULTIFÁSICOS 28

1.1.5.1 Suspensiones diluidas 28

1.1.5.2. Distribución de partículas en la fase continua a través de tuberías. 31

1.1.6 FUERZAS INTERMOLECULARES 32

1.1.6.1 Fuerzas de van der Waals 33

1.1.6.2 Constante de Hamaker 34

1.1.6.3 Adhesión 35

CAPÍTULO DOS ▪ PROCEDIMIENTO 36

2.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL DISIPADOR DE CALOR 36

2.2 PROPUESTA DE DISEÑO DEL BLOQUE DE FUNDICIÓN 39

2.3 COMPORTAMIENTO DE LA FASE CONTINUA EN EL EXTRUSOR 40

2.4 ANÁLISIS DE LA SEGUNDA FASE 47

2.4.1 ANÁLISIS DE INTERACCIONES INTERMOLECULARES 52

2.4.1.1 Adhesión de las partículas al filamento de PLA sólido 53

2.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DENTRO DEL CONDUCTO 56

2.4.3 DISEÑO DE LA ZONA DE MEZCLADO 57

2.5 SIMULACIÓN DEL FLUIDO A TRAVÉS DEL CONDUCTO 61

CAPÍTULO TRES ▪ RESULTADOS 63

3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN LOS DISIPADORES DE CALOR. 63

3.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL COMPUESTO 65

3.2.1. DENSIDAD 65

3.2.2. VISCOSIDAD DINÁMICA DEL COMPUESTO CON DIAMANTE A $205\ °C$ 65

3.2.3. ESFUERZO CORTANTE EN LA PARED DEL CONDUCTO (DIAMANTE-FLUIDO) 66

3.2.4. VISCOSIDAD DINÁMICA DEL COMPUESTO CON NTC 66

3.2.5. ESFUERZO CORTANTE EN LA PARED DEL CONDUCTO (NTC-FLUIDO) 67

3.3 DISEÑO FINAL DEL ELEMENTO DE FUNDICIÓN 68

3.4 SIMULACIÓN DEL FLUIDO 69

3.4.1 PLA CON PARTÍCULAS DE DIAMANTE 69

3.4.2 PLA CON NANOTUBOS DE CARBONO 70

3.5 VALIDACIÓN EN MICROSCOPIO 72

3.6 AJUSTES DEL CONTROL PID DE LA IMPRESORA 3D 73

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 74

TRABAJOS CITADOS 76

APÉNDICE A 81

FICHA TÉCNICA *HEXAGON* 81

FICHA TÉCNICA *E3D-V5* 82

APÉNDICE B 83

GEOMETRÍA PARA LA SIMULACIÓN EN ANSYS 17.0 83

APÉNDICE C 84

FICHA TÉCNICA DEL BLOQUE DE FUNDICIÓN 84

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1. Elementos que conforman el extrusor de la impresora R1. ..... *12*

Ilustración 1.2. Wade's Geared Extruder. *13*

Ilustración 1.3. Extremo caliente (Hotend) de la marca Hexagon. *13*

Ilustración 1.4. Partes que conforman el elemento caliente o Hotend. *14*

Ilustración 1.5. Pandeo del filamento en el extrusor. *16*

Ilustración 1.6. Ejemplo de la influencia de la temperatura en la viscosidad de un polímero. *18*

Ilustración 1.7. División geométrica del *Hotend* para el modelado matemático. *19*

Ilustración 1.8. Representaciones esquemáticas de las diversas características geométricas y espaciales de las partículas de la fase dispersa que pueden influir en las propiedades de los compuestos: *22*

Ilustración 1.9. Clasificación de los materiales compuestos. *22*

Ilustración 1.10. Factores de las inclusiones que influyen en las propiedades de los materiales compuestos reforzados con partículas. *23*

Ilustración 1.11. Estructura de NTC de pared simple (Single-walled) y de pared múltiple (Multi-walled). *25*

Ilustración 1.12. Estructura cristalina del diamante. *26*

Ilustración 1.13. Cálculo de la relación de aspecto "p" para distintos tipos de partículas. *29*

Ilustración 1.14. Proceso de rompimiento de aglomerados en la suspensión. *30*

Ilustración 1.15. Separación promedio entre partículas. *30*

Ilustración 1.16. Movimiento de una partícula en flujo laminar debido a interacciones hidrodinámicas. *32*

Ilustración 2.1. *Hotend* modelo *E3D-v5*, geometría del disipador de calor (a) e implementación del ventilador a través del soporte incluido (b)..... *37*

Ilustración 2.2. Temperatura del aire circundante al rededor del *hotend* modelo *Hexagon*..... *38*

Ilustración 2.3. Temperatura del aire circundante al rededor del *hotend* modelo *E3D-v5* *38*

Ilustración 2.4. Propuesta de diseño del bloque de fundición..... *39*

Ilustración 2.5. Balance de fuerzas que actúan sobre un volumen de control durante el flujo a través de una tubería..... *41*

Ilustración 2.6. Geometría del interior del bloque de fundición..... *44*

Ilustración 2.7. Distribución de temperaturas en el *hotend*..... *44*

Ilustración 2.8. Comportamiento viscoso del fluido dependiente de la velocidad de corte..... *45*

Ilustración 2.9. Comportamiento pseudplástico del PLA dentro del bloque de fundición. *45*

Ilustración 2.10. Influencia de las partículas de diamante en el comportamiento reológico del PLA..... *49*

Ilustración 2.11. Influencia de los NTC en el comportamiento reológico del PLA. *49*

Ilustración 2.12. DCL de las fuerzas que actúan en el fenómeno de adhesión de un nanotubo de carbono y una partícula de diamante sintético, respectivamente. *55*

Ilustración 2.13. Formación de un vórtice en un borde agudo..... *57*

Ilustración 2.14. Capa límite y espesor de deslizamiento..... *58*

Ilustración 2.15. Detalles de los perfiles de rosca M y UN..... *59*

Ilustración 2.16. Calidad del elemento. *61*

Ilustración 2.17. Relación de aspecto de los elementos del mallado..... *61*

Ilustración 2.18. *Skewness* en los elementos del mallado..... *62*

Ilustración 2.19. Ortogonalidad de los elementos del mallado. *62*

Ilustración 3.1. Gradiente de temperaturas modelo *Hexagon*..... *63*

Ilustración 3.2. Gradiente de temperaturas modelo *E3D-v5*..... *64*

Ilustración 3.3. Densidad del compuesto de acuerdo a la regla de mezclas. *65*

Ilustración 3.4. Viscosidad del PLA y del compuesto para distintas concentraciones de diamante..... *65*

Ilustración 3.5. Variación del esfuerzo cortante en el conducto por partículas de diamante..... *66*

Ilustración 3.6. Viscosidad del PLA y del compuesto para distintas concentraciones de NTC. *66*

Ilustración 3.7. Variación del esfuerzo cortante en el conducto por nanotubos de carbono. *67*

Ilustración 3.8. Relación entre la presión interna, la viscosidad y la velocidad de extrusión del PLA. *67*

Ilustración 3.9. Corte transversal del bloque de fundición..... *68*

Ilustración 3.10. Vista del bloque de fundición..... *68*

Ilustración 3.11. Ensamble del elemento de fundición, garganta y disipador de calor. *68*

Ilustración 3.12. Líneas de corriente en el conducto (PLA-Diamante)..... *69*

Ilustración 3.13. Distribución de velocidades del PLA-Diamante en la zona de mezclado. *69*

Ilustración 3.14. Gradiente de velocidades en la zona de extrusión (PLA-Diamante). *70*

Ilustración 3.15. Líneas de corriente en el conducto (PLA-NTC). *70*

Ilustración 3.16. Distribución de velocidades del PLA-NTC en la zona de mezclado. *71*

Ilustración 3.17. Gradiente de velocidades en la zona de extrusión (PLA-NTC). *71*

Ilustración 3.18. Filamento de PLA virgen para impresión 3D. *72*

Ilustración 3.19. Filamento de PLA extruído con diamante sintético (izquierda) y NTC (derecha). *72*

Ilustración 3.20. Captura de pantalla del proceso de *autotune*..... *73*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades del filamento PLA..... *21*

Tabla 1.2. Propiedades de NTC en comparación a otros materiales..... *25*

Tabla 1.3. Propiedades del diamante..... *26*

Tabla 1.4. Energía de interacción y fuerza entre cuerpos macroscópicos de diferentes geometrías en términos de la constante de Hamaker. *35*

Tabla 2.1. Comparación entre *hotends*: *Hexagon* y *E3D-v5.*..... *36*

Tabla 2.2. Viscosidad del PLA según la ley de potencia. *40*

Tabla 2.3. Conductancia de secciones circulares y cónicas..... *43*

Tabla 2.4. Valores propuestos para la velocidad de extrusión y su influencia en el material fundido. *46*

Tabla 2.5. Materiales utilizados en el presente trabajo..... *48*

Tabla 2.6. Comportamiento reológico del compuesto con diamante según la velocidad de extrusión. *50*

Tabla 2.7. Comportamiento reológico del compuesto con NTC según la velocidad de extrusión. *51*

Tabla 2.8. Constantes de Hamaker *en vacío* de los materiales utilizados en este proyecto. *53*

Tabla 2.9. Posición de equilibrio para partículas de diamante. *56*

Tabla 2.10. Posición de equilibrio para NTC..... *56*

Tabla 2.11. Tipos de rosca compatibles (aproximadamente) con el diámetro del conducto..... *60*

JUSTIFICACIÓN

Los materiales compuestos han resultado en una alternativa para la solución de problemas tecnológicos desde los años 40's enfocándose en sus inicios hacia aplicaciones militares. Sin embargo, dichos materiales comenzaron a llamar la atención de las industrias a comienzos de los 60's, con el desarrollo de materiales compuestos de base polimérica [1]. El crecimiento de los materiales compuestos se obtuvo principalmente a partir de mejoras en los componentes fabricados; mayor rendimiento y disminución del peso del componente fueron los principales beneficios obtenidos que colaboraron al reemplazo del uso del acero y el aluminio en numerosas aplicaciones. En resumen, los componentes de los materiales compuestos trabajan en conjunto de manera que las propiedades finales de dicho conjunto son mejores que las propiedades de los materiales constituyentes. Sin embargo, dicha tecnología se ve limitada a los compuestos que se adicionan a manera de refuerzos que si bien incrementan la resistencia a la tensión y a la fractura del material (entre otras propiedades) repercuten incrementando su densidad y su costo de producción.

La tecnología de impresión en 3D por deposición fundida o también llamada por filamento fundido, actualmente ha sido beneficiada por el desarrollo de materiales compuestos con base en una matriz polimérica, logrando así el desarrollo de piezas de un alto nivel de complejidad siendo la ingeniería médica de las principales beneficiadas por este tipo de tecnología [2]. Existe una amplia gama de materiales poliméricos que pueden ser utilizados con esta tecnología, incluso es posible encontrar en el mercado filamentos de matriz polimérica con inclusiones de nanotubos de carbono (NTC), sin embargo el costo excesivo de estos filamentos a base de carbono ($299 USD por 0.5 kg de filamento [3]) limita su aplicación con fines médicos, industriales o para algún otro propósito, debido en gran medida a los costos de producción del filamento.

En consecuencia, en este proyecto se pretende realizar la extrusión de una segunda fase en una matriz polimérica de ácido poliláctico, también llamado poliácido láctico (PLA), debido a su capacidad de ser biodegradable y biocompatible y que actualmente se utiliza en una serie de aplicaciones biomédicas. Con esto, y el desarrollo de materiales compuestos desde el punto de vista de aplicación de fuerzas, deformaciones y energía, se busca el prototipado rápido de piezas mecánicas con propiedades mecánicas y funcionales dirigidas según la necesidad del usuario para permitir la creación de estructuras complejas que permitan integrarse o interactuar con otras estructuras, incluidos organismos vivos.

OBJETIVOS

Realizar la adecuación de una impresora 3D por hilo caliente con la capacidad de incluir, durante la extrusión, partículas de un segundo material para generar hilos de material compuesto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el extremo caliente del extrusor con el fin de mezclar adecuadamente el polímero PLA y la segunda fase.

- Adecuar un sistema simple para la aplicación del segundo material al filamento de PLA priorizando un control manual del usuario para dicha aplicación según sus requerimientos.

- Determinar las velocidades de extrusión óptimas de acuerdo al porcentaje del material en la segunda fase del compuesto.

- Estudiar el modelo propuesto mediante análisis de elemento finito utilizando software especializado.

- Modificar los parámetros del control PID de la impresora a fin de corregir el funcionamiento del termistor debido a las modificaciones realizadas.

PROBLEMAS A RESOLVER

Las soluciones de los problemas que emergen de los objetivos del proyecto se integran en una limitante fundamental que corresponde a las características de los componentes de la impresora 3D con la cual se pretende trabajar.

El modelo de la impresora corresponde a la marca ROBO 3D, y sus características técnicas (sólo las relevantes para el presente estudio) se presentan en la tabla 1. En la ilustración 1 se muestra la impresora 3D R1.

FICHA TÉCNICA		
Modelo		R1
Tarjeta madre		Arduino MEGA 2560/RAMPS
Número de extrusores		1
Motores		Nema 17/1.8/200 pasos en 360 grados
Paquete de software		MatterControl
Tipo de archivo		G-code
Dimensiones de impresión		25.4 x 22.9 x 20.3 cm
Temperatura del extrusor		Hasta 280 °C
Temperatura de cama de impresión		Hasta 110 °C
Resolución de capas		0.1 mm – 0.3 mm (ajustable)
Precisión de posicionamiento		Eje X: 11 µm Eje Y: 11 µm Eje Z: 1.6 µm
Velocidad		Hasta 100 mm/s
Extrusor	Extremo caliente	Hexagon
	Extremo frío	“Wade’s Geared Extruder”

Tabla I. Ficha técnica de la impresora Robo 3D R1

Ilustración I. Impresora Robo 3D R1

Debido a las dimensiones de impresión no es posible disponer de un sistema de extrusión robusto, mayor al incluido de fábrica el cual es un sistema de extrusión directo montado directamente sobre el carro del cabezal.

El extremo frío (*Wade’s Geared Extruder*) se enfoca principalmente en obtener una buena relación de torque, facilitar la calibración del filamento y evitar el uso de materiales complicados de conseguir tal como el tubo de PTFE utilizado frecuentemente en el arreglo de tipo *Bowden* (por extrusión indirecta).

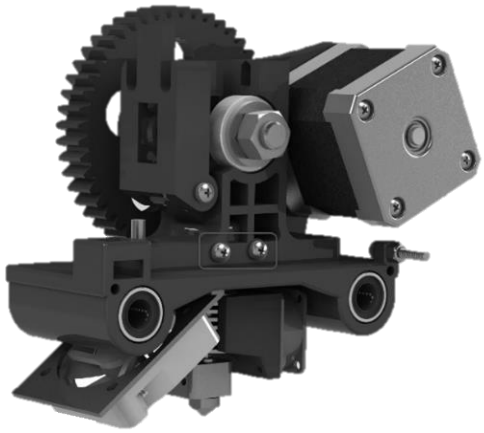


Ilustración II. Sistema de extrusión montado en la impresora R1.

Por otro lado, el extremo caliente del extrusor es el componente encargado de fundir el filamento y a su vez está provisto de aletas para disipar el calor con el objetivo de evitar dañar a los componentes del extremo frío. De acuerdo a diversos comentarios de usuarios en foros [4], el extremo caliente *Hexagon*, de la marca *RepRapDiscount*, instalado de fábrica en la impresora, tiende a sufrir bloqueos de material con distintos tipos de PLA y la eficiencia del disipador de calor disminuye en tiempos de funcionamiento prolongados. Esto sugiere un problema mayor al tratar con una segunda fase de material con partículas que afectan la viscosidad del polímero fundido que si bien es posible la aplicación de ondas ultrasónicas, se necesita encontrar un punto de equilibrio donde se establezca una dispersión satisfactoria de la segunda fase con la matriz polimérica y a su vez se eviten fenómenos que puedan dañar a los materiales tales como la cavitación y con ello el rompimiento de las cadenas poliméricas del PLA.

En ciertos materiales la alineación de sus partículas juega un papel fundamental en la caracterización de sus propiedades mecánicas y funcionales. En ocasiones dicha alineación se puede lograr mediante la aplicación de un campo magnético las partículas requeridas como segunda fase, tal es el caso de los nanotubos de carbono (NTC), cuyas propiedades están directamente relacionadas con su dirección de alineamiento dentro de la matriz [5]. Para lograr la alineación se requiere de una densidad de flujo magnético mínima que en el caso de los NTC se obtiene con 0.5 Teslas siempre y cuando sean mezclados con óxido de hierro [6].

Por último, la modificación del extremo caliente del extrusor da origen a un desajuste en las constantes k_p, k_i y k_d que corresponden al control PID (Proporcional - Integral Derivativo) utilizado para el funcionamiento de la resistencia de tipo cartucho y la cama caliente en la impresora. La importancia de dicho control radica en que el funcionamiento de la impresora depende de la temperatura objetivo a la que se desea fabricar la pieza; de manera que si la temperatura sube rápidamente y se ralentiza cuando se aproxima a la temperatura objetivo, o si oscila unos pocos grados en ambos lados de la temperatura objetivo, entonces los valores son incorrectos.

CAPÍTULO UNO ▪ Introducción

1.1 ESTADO DEL ARTE Y TEORÍA BÁSICA

Manufactura aditiva (AM) es el nombre con el que se conoce al conjunto de técnicas y procesos que permiten fabricar objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material. Una de las técnicas que aportan al desarrollo de la manufactura aditiva es el diseño asistido por computadora (CAD) en donde el desarrollo de modelos 3D y la rapidez característica con la que son concebidos ha creado un nuevo concepto en los procesos de fabricación conocido como *Rapid Prototyping* (RP) o Prototipado Rápido. Dicha técnica permite reproducir modelos con ahorro de tiempo y costo en comparación con los métodos tradicionales de fabricación. Las principales técnicas de prototipado rápido son:

- Estereolitografía.
- Sinterizado selectivo con láser (SLS).
- Manufactura de objetos laminados (LOM).
- Prototipado por filamento fundido.

Actualmente el prototipado rápido por filamento fundido posee dos ramas principales:

- Modelado por Deposición Fundida (FDM): En desarrollo por las empresas Stratasys y 3DSystems con patentes e investigaciones propias, proveyendo equipos con una relativa facilidad de operación, capacidad de producción de precisión, alta repetitividad del proceso sin necesidad de recalibrar, pero un costo de inversión y de operación alto.
- Fabricación por filamento fundido: Equipos enfocados al *Open Source* o de recurso abierto, con la posibilidad de realizar cambios a gusto del usuario. El costo de inversión y mantenimiento es menor al FDM además de contar con una amplia variedad de materiales disponibles.

Es gracias al concepto *Open Source*, que se pone de manifiesto el crecimiento de la comunidad de usuarios dispuestos a la compartición de conocimiento sobre la tecnología

de impresión 3D a tal grado de dar puerta a uno de los proyectos que mejor ilustra esta filosofía: el proyecto *RepRap*, iniciado en febrero de 2004 por Andrian Bowyer en Inglaterra, término fruto de la unión de las palabras *Replicating Rapid-prototyper* el cual se basa en la construcción de la primera máquina autoreplicante de uso general de la humanidad [7].

La gran diversificación generada por el proyecto *RepRap* es muy basta como para realizar un seguimiento de tecnologías y equipos generados, pero los fundamentos tras el proyecto y las tecnologías compartidas dentro de la comunidad fundamentan y son parte funcional del desarrollo de este trabajo.

1.1.1 LA IMPRESORA ROBO 3D R1

Como todo equipo utilizado para la fabricación por filamento fundido, la impresora R1 tiene un sistema de posicionamiento el cual sigue una trayectoria previamente generada mediante códigos G en el paquete de software con el diseño previamente convertido a formato *STL*. Dicho posicionamiento sirve para colocar un extrusor, el cual deposita delgados filamentos capa por capa para formar un modelo tridimensional. La primera capa se coloca sobre una superficie plana y nivelada, la cual puede proveer calor a la pieza para promover la adherencia del material y evitar separaciones entre capas, esto dependiendo del tipo de material utilizado.

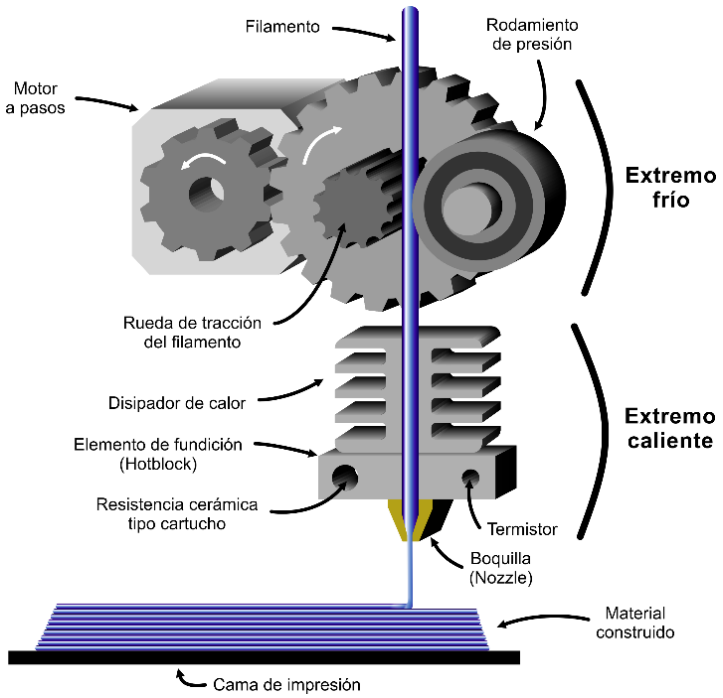


Ilustración 1.1. Elementos que conforman el extrusor de la impresora R1.

1.1.1.1 Extrusor

El extrusor es el elemento que se encarga de introducir el filamento proveniente de la bobina de alimentación hacia el extremo caliente en el cabezal de la impresora. El principio de extrusión del filamento se divide en dos categorías: por extrusión indirecta y por extrusión directa; este último es el empleado en la impresora R1. Este elemento, a su vez, se divide en dos secciones: extremo frío y extremo caliente.

- El **extremo frío** alimenta al extremo caliente introduciendo el filamento con la fuerza suficiente como para ser extrudida a través de la boquilla. El extremo frío se compone de los elementos de sujeción del filamento (rueda de tracción y rodamiento de presión) y la transmisión de potencia otorgada a través de un motor a pasos. Existen diversos tipos de configuraciones, sin embargo la utilizada en la impresora R1 es la denominada *Wade's Geared Extruder*.

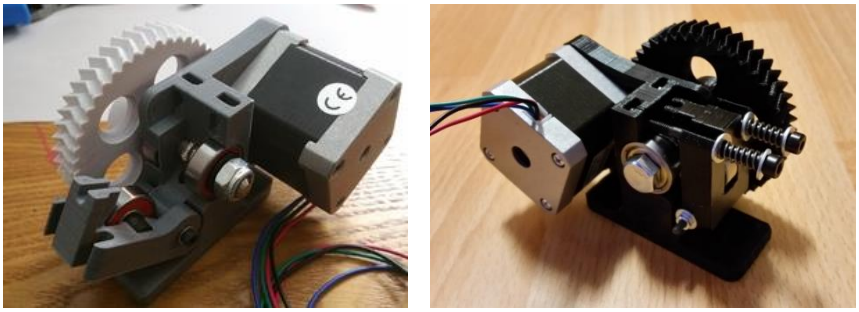


Ilustración 1.2. Wade's Geared Extruder.

- El **extremo caliente** es la sección donde se funde el filamento para su extrusión a través de la boquilla o *nozzle*. En la ilustración 1.4 se representa las partes que componen al extremo caliente o *hotend* de la marca *Hexagon* incluida en la impresora.

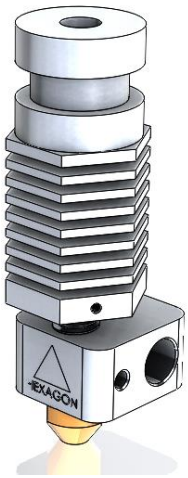


Ilustración 1.3. Extremo caliente (Hotend) de la marca Hexagon.

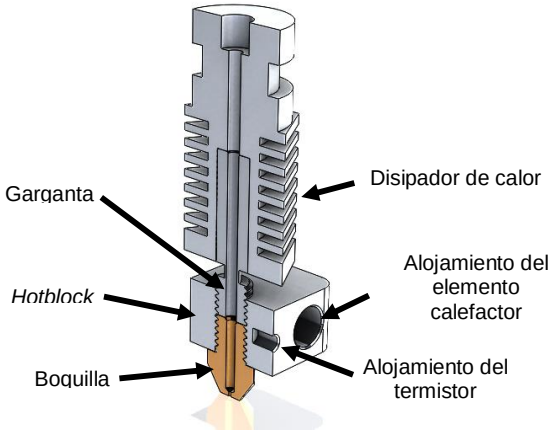


Ilustración 1.4. Partes que conforman el elemento caliente o Hotend.

- Disipador de calor: Fabricado en aluminio con una configuración de aletas para facilitar el intercambio de calor con el aire circundante forzado por el ventilador situado a un costado. Dicho intercambio es imprescindible para no causar la fundición prematura del filamento y además evitar daños a los elementos estructurales situados en el cabezal de la impresora.
- Garganta: Este componente sirve de unión entre el disipador de calor y el *hotblock*. Fabricado en acero inoxidable, aloja en su interior un recubrimiento de PTFE con el objetivo de facilitar el deslizamiento del filamento en su interior y así evitar bloqueos de material debido a una fusión prematura del mismo.
- Elemento de fundición o *Hotblock:* Se trata de un bloque de aluminio barrenado para alojar otros elementos tales como el elemento calefactor, el termistor y sirve de unión entre la garganta y la boquilla.
- Boquilla o *nozzle*: Es el último elemento mecánico del *Hotend* y es donde se funde el material, además de encargarse de depositarlo sobre la cama de impresión. Generalmente es fabricado en latón aunque eso depende del filamento que se esté utilizando. Los diámetros de boquilla comerciales van de $0.2\ mm$ a $0.6\ mm$, siendo la de $0.4\ mm$ la más recurrente y la utilizada por defecto en la impresora R1
- Elemento calefactor: Es una resistencia cerámica de tipo cartucho alimentada a $12\ V$ que tiene una potencia nominal de $40\ W$ utilizado para generar el calor necesario para fundir el filamento.
- Termistor: Transductor de temperatura utilizado para el control de la temperatura de extrusión.

1.1.2 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN

1.1.2.1 Modelado del mecanismo de alimentación

La alimentación de filamento que es controlada por la rueda de tracción y el rodamiento de presión. El material por encima de estos elementos se encuentra bajo tensión; lo cual cambia en cuanto se encuentran debajo de ellos para ser considerado a compresión y de esa manera es empujado hasta la boquilla a través del extremo caliente. Para que el flujo volumétrico Q del material se mantenga constante a través de la boquilla de extrusión, la velocidad de alimentación puede ser aproximada considerando el ancho de extrusión W y la altura de la capa H [8], por lo tanto:

$$v = \frac{Q}{W(H)} \tag{1.1}$$

Sin embargo, asumiendo que no hay deslizamiento entre los elementos de sujeción y el filamento, la velocidad de alimentación también puede ser simplificada relacionándolo con la velocidad angular ω de la rueda de tracción y su radio R_t:

$$v = \omega(R_t) \tag{1.2}$$

Por otro lado, la fuerza F necesaria para empujar el material a través del extremo caliente puede determinarse si se conoce la diferencia de presión ΔP en dicho extremo y el área de la sección transversal A del extremo caliente donde se funde el filamento:

$$F = \Delta P \cdot A \tag{1.3}$$

La compresión del filamento en el extremo caliente, provocada por los elementos de sujeción, establece un límite en la velocidad de alimentación. Cuando la compresión provoca un esfuerzo límite en el filamento, este puede deformarse o pandearse, como se muestra en la ilustración 1.5. Este problema es común dentro de la comunidad para aquellos que trabajan con filamentos flexibles o sistemas de extrusión del tipo *Bowden*.

Una aproximación de dicho esfuerzo límite que provocaría la deformación en el filamento puede obtenerse de un análisis de pandeo de Euler tal como se presenta en la ecuación (1.4).

$$\sigma_{lím} = \frac{\pi E d_f^2}{16 L_f^2} \tag{1.4}$$

donde E corresponde al módulo elástico del filamento, d_f es el diámetro del filamento y L_f determina la longitud del filamento desde los elementos de sujeción hasta la entrada del extremo caliente. Relacionando las ecuaciones (1.3) y (1.4), la condición de pandeo puede representarse como:

$$1.1\Delta P \geq \sigma_{lím} \tag{1.5}$$

El factor de corrección 1.1 en la ecuación (1.5) es debido a la diferencia en la sección transversal entre el área del filamento y el orificio de entrada del mismo en el extremo caliente [9]. De manera que la cantidad $\Delta P/E$ depende del material usado, de la temperatura de operación, de la geometría de la boquilla (*nozzle*) y del flujo volumétrico.

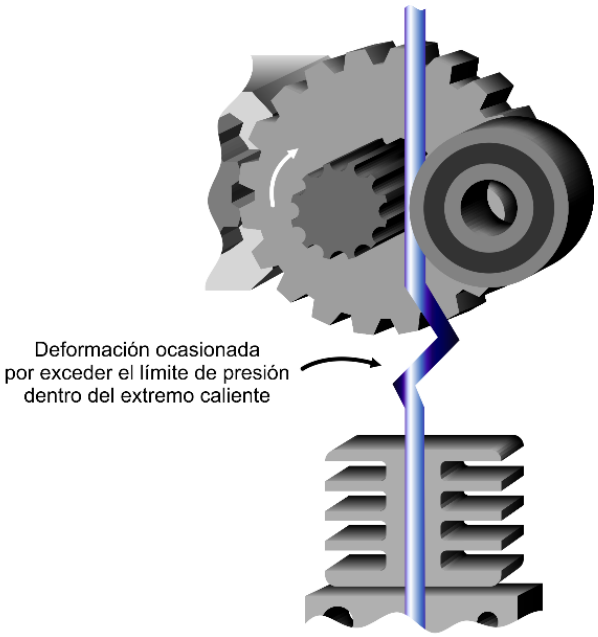


Ilustración 1.5. Pandeo del filamento en el extrusor.

Por otro lado, Turner *et al.* [10] establecen que la cantidad de masa fundida presente en el *Hotend*, la temperatura de la masa fundida y, en consecuencia, la viscosidad y la energía superficial de la masa varían con la velocidad de alimentación. A su vez estas variables controlan la velocidad con la que el material fluye a través de la boquilla y la resolución del elemento impreso.

1.1.2.2 Comportamiento reológico del material fundido

La dinámica del comportamiento del material a extruir a través del elemento de fundición es compleja de modelar, ya que las propiedades de fusión del filamento se estudian con un enfoque de fluido no newtoniano, es decir, que no existe relación directa entre el esfuerzo cortante τ y la velocidad de corte $\dot{\gamma}$. A pesar que existen modelos complejos y extensos (tales como la ley de Bir Carreau, la ley de Cross, etc.) se puede describir dicho comportamiento del material a través de un modelo basado en la ley de potencia [11], o modelo de Ostwald de Waele, el cual es uno de los más utilizados para explicar el comportamiento newtoniano, dilatante y pseudoplástico dependiendo de un valor n. En este caso, los materiales poliméricos utilizados en tecnologías de fabricación por filamento fundido exhiben un comportamiento pseudoplástico, es decir, su viscosidad η decrece cuando la velocidad de corte incrementa [12].

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)}, \tag{1.6}$$

donde K y n son constantes que describen el índice de consistencia del fluido y el índice de comportamiento no newtoniano (adimensional), respectivamente. Para que un fluido se determine como pseudoplástico, se requiere que $n < 1$ (valores de entre 0.2 y 0.7 son válidos para la mayoría de los polímeros). La fluidez del material lo representa el parámetro ϕ, mientras que m representa el exponente de flujo, el cual describe la desviación del comportamiento newtoniano; ambos términos pueden relacionarse con los parámetros de la ecuación (1.6):

$$n = \frac{1}{m} \tag{1.7}$$

$$K = \phi^{\frac{1}{m}} \tag{1.8}$$

Cuando se grafica la viscosidad frente a la velocidad de corte, la curva generalmente disminuye al aumentar la temperatura (ilustración 1.8), esto significa que el efecto que provoca la temperatura sobre la viscosidad no se puede despreciar. Lo anterior surge como resultado en el incremento de la movilidad de las moléculas del polímero. Como regla general, los polímeros amorfos tienen una alta sensibilidad a la temperatura, mientras que para los polímeros semi-cristalinos la sensibilidad es relativamente baja [13].

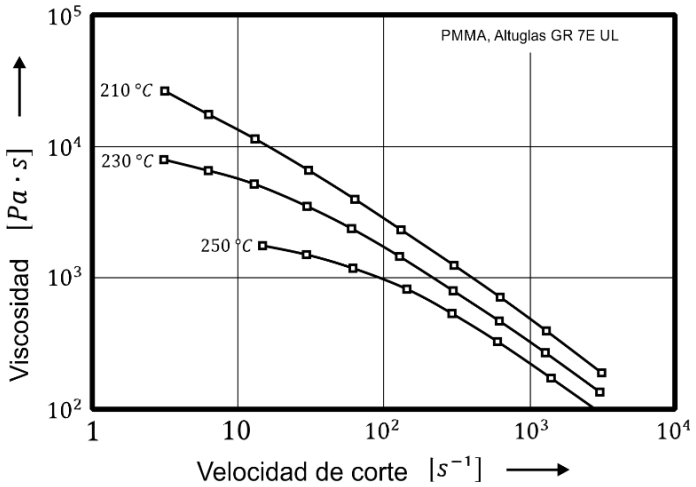


Ilustración 1.6. Ejemplo de la influencia de la temperatura en la viscosidad de un polímero.

Debido a que la dependencia de la viscosidad a la temperatura debe considerarse junto con su dependencia a la velocidad de corte, la ecuación (1.6) puede redefinirse por una relación de Arrhenius:

$$\eta = a_T \cdot \eta_0 \tag{1.9}$$

donde η_0 representa la viscosidad a una temperatura de referencia T_r (valor de la temperatura a la que se han determinado los parámetros m y ϕ de la ley de potencia). Generalmente la ecuación (1.10) es utilizada para determinar el factor de cambio a_T, considerando al término β como la energía de activación.

$$a_T = exp\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \tag{1.10}$$

1.1.2.3 Dinámica del material fundido a través del elemento de fundición.

Roxas y Ju [14] dividen el elemento de fundición en tres zonas geométricas por donde transita el material a extruir, esto con el objetivo de representar las ecuaciones que describen su comportamiento a través de dicha geometría Esta geometría consiste en un tubo cilíndrico recto con una conexión cónica truncada a la abertura de la boquilla (*nozzle*) de extrusión (ilustración 1.9). La base para los cálculos relativos a la dinámica del flujo del material fundido son las leyes de conservación de masa, momento y energía. Sin embargo, para la estimación del análisis, se requiere contar con algunas suposiciones para simplificar el desarrollo de las ecuaciones [15]:

- Flujo en estado estable: en ningún punto del flujo existe cambios transitorios.
- Movimiento lento del flujo: las fuerzas de inercia son insignificantes comparadas con las fuerzas de fricción; se supone flujo laminar con bajos números de Reynolds (Re).
- Flujo isotérmico: todas las partículas del fluido tienen la misma temperatura.
- Fluido incompresible, i.e., la densidad del fluido es constante.
- No existen fuerzas externas interactuando con el fluido.
- El efecto de la gravedad es despreciable.
- El material a extruir se adhiere a las paredes internas del elemento de fundición, i.e., la velocidad del fluido en las paredes es igual a cero.

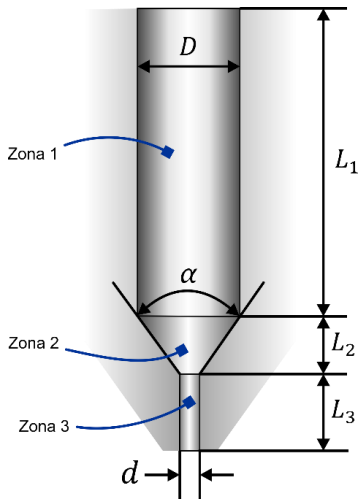


Ilustración 1.7. División geométrica del *Hotend* para el modelado matemático.

Una vez que se cumplen las condiciones anteriores, las ecuaciones fundamentales simples se pueden derivar de un equilibrio de flujo de momento [15]:

$$\begin{Bmatrix} Flujo\ de\ momento \\ por\ unidad\ de\ tiempo \\ (Entrada) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} Flujo\ de\ momento \\ por\ unidad\ de\ tiempo \\ (Salida) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Suma\ de\ todas \\ las\ fuerzas\ actuando \\ en\ el\ sistema \end{Bmatrix} = 0$$

$$\vec{I}_1 - \vec{I}_2 + \sum \vec{F} = \vec{0} \tag{1.11}$$

Desarrollando las ecuaciones encontradas en la literatura [8] [14] [15] y aplicando el balance de flujo de momento en las zonas 1,2 y 3 del *Hotend* es posible determinar la diferencia de presión para cada caso:

$$\Delta P_1 = 2L_1 \left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}} \left[\frac{m+3}{\left({}^{D}/_{2}\right)^{m+1}}\right]^{\frac{1}{m}} \tag{1.12}$$

$$\Delta P_2 = \left(\frac{2m}{3\tan\frac{\alpha}{2}}\right)\left[\frac{1}{\left(d/2\right)^{\frac{3}{m}}} - \frac{1}{\left(D/2\right)^{\frac{3}{m}}}\right]\left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}}\left[\left(\frac{D}{2}\right)^{2}(m+3)(2^{m+3})\right]^{\frac{1}{m}} \tag{1.13}$$

$$\Delta P_3 = 2L_3\left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}}\left[\frac{\left(D/2\right)^{2}(m+3)}{\left(d/2\right)^{m+3}}\right]^{\frac{1}{m}} \tag{1.14}$$

La velocidad v corresponde a la velocidad del filamento a la entrada del elemento de fundición. Ya que en esta etapa el material aún permanece en forma sólida, este valor es constante y uniforme en la sección transversal [8]. Puesto que la temperatura juega un papel importante en el comportamiento del material repercutiendo en gran medida en la viscosidad del mismo, la ecuación (1.10) se incluye dentro de las ecuaciones (1.12), (1.13) y (1.14) de tal manera que:

$$\Delta P_1 = 2L_1\left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}}\left[\frac{m+3}{\left(D/2\right)^{m+1}}\right]^{\frac{1}{m}} e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right)\right]} \tag{1.15}$$

$$\Delta P_2 = \left(\frac{2m}{3\tan\frac{\alpha}{2}}\right)\left[\frac{1}{\left(d/2\right)^{\frac{3}{m}}} - \frac{1}{\left(D/2\right)^{\frac{3}{m}}}\right]\left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}}\left[\left(\frac{D}{2}\right)^{2}(m+3)(2^{m+3})\right]^{\frac{1}{m}} e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right)\right]} \tag{1.16}$$

$$\Delta P_3 = 2L_3\left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}}\left[\frac{\left(D/2\right)^{2}(m+3)}{\left(d/2\right)^{m+3}}\right]^{\frac{1}{m}} e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right)\right]} \tag{1.17}$$

Retomando la ecuación (1.3) puede encontrarse la diferencia de presión a lo largo del extremo caliente:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \tag{1.18}$$

De las ecuaciones (1.15) a la (1.18) se puede observar que cuando ocurre un cambio repentino en la velocidad de alimentación la temperatura promedio T desciende, lo que resulta en un aumento considerable en la diferencia de presión en el sistema [8].

Finalmente el flujo del material viscoso a través de la boquilla puede analizarse considerando un flujo de Hagen-Poiseuille, de manera que el flujo volumétrico Q se reduce para altos valores en la viscosidad del fluido η, valores de orificio d pequeños o longitudes L_3 grandes del mismo; a una presión de deposición ΔP_3 determinada [16]:

$$Q = \frac{\pi d_3^4 \Delta P_3}{128 \eta L_3} \tag{1.19}$$

1.1.3 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

El ácido poliláctico o poli (ácido láctico) es un poliéster alifático proveniente del ácido láctico. Es un termoplástico derivado de fuentes renovables, tales como almidón de maíz, tapioca o caña de azúcar y debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad ha sido considerado para un numeroso rango de aplicaciones (hilos para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis, producción de envases y empaques para alimentos, entre otros) [17]. El PLA es la materia prima que constituye uno de los filamentos más comunes para su uso en impresoras 3D (sólo por debajo del ABS). En la tabla 1.1 se enlistan algunas de las propiedades que posee el filamento a base de PLA.

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (ρ)	$1250\ kg/m^3$
Temperatura de transición vítrea (T_g)	$59\ °C$
Temperatura de fusión (T_m)	$152\ °C$
Temperatura inicial de descomposición $(T_{d,0})$	$335\ °C$
Energía promedio de activación (E_{act})	$205 - 297\ kg/mol$
Coeficiente de fricción	0.37
Módulo elástico (E)	$3.5\ GPa$

Tabla 1.1. Propiedades del filamento PLA.

1.1.4 MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto simple, posee dos fases; una de ellas es continua y se conoce como matriz, la cual rodea a la segunda fase conocida como refuerzo o fase dispersa. Las ventajas resultantes de la combinación de ambos materiales radican en que cada uno aporta sus propias características al compuesto [18], es decir, las propiedades del compuesto están en función de las propiedades de las fases constituyentes, sus proporciones y la geometría de la fase dispersa, la cual se refiere a la forma de las partículas y su tamaño, distribución y orientación [19] tal como se muestra en la ilustración 1.10.

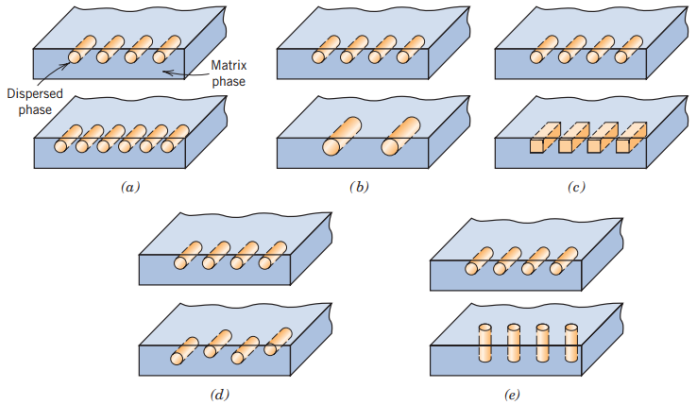


Ilustración 1.8. Representaciones esquemáticas de las diversas características geométricas y espaciales de las partículas de la fase dispersa que pueden influir en las propiedades de los compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución, y (e) orientación.

Los materiales compuestos pueden clasificarse por medio de la geometría del refuerzo como o son: partículas o inclusiones, fibras y compuestos estructurales [19]; y estos a su vez se subdividen en dos categorías por cada uno. Cuando se tienen partículas como fase dispersa, se dice que el compuesto es equiaxial, es decir que tienen aproximadamente las mismas dimensiones en todas direcciones. En la ilustración 1.11 se presenta la clasificación de los materiales compuestos y sus subdivisiones.

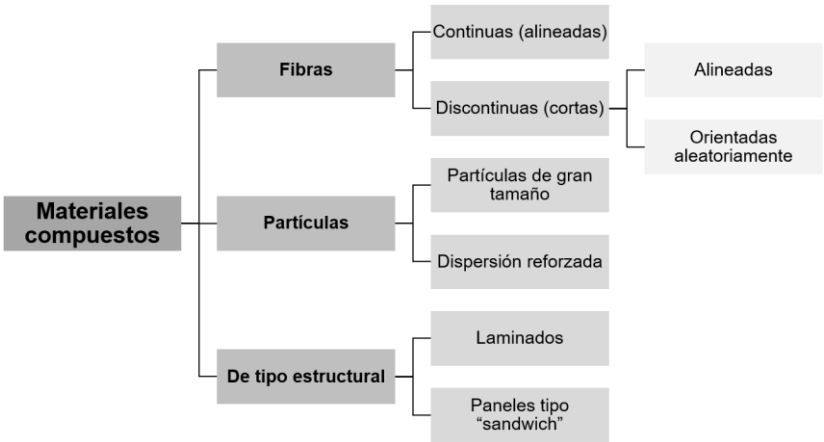


Ilustración 1.9. Clasificación de los materiales compuestos.

1.1.4.1 Refuerzo por partículas o inclusiones

El refuerzo aplicado a la fase continua mediante inclusiones se clasifica en partículas de gran tamaño y en dispersión reforzada, tal como se muestra en la ilustración 1.11. La diferencia entre ellos radica en el mecanismo de refuerzo.

En cuanto a un refuerzo por partículas de gran tamaño no puede ser analizado a través de un nivel atómico o molecular, en cambio, la mecánica de medios continuos resulta satisfactoria para describir la interacción de estos componentes. En esencia, estas partículas de refuerzo tienden a restar movimiento a la fase continua en los límites de cada partícula.

Por otro lado, los compuestos con refuerzo por dispersión se caracterizan porque las partículas son muy pequeñas con diámetros promedio que van de 0.01 a $0.1\,\mu m$ (10 a $100\,nm$). Las interacciones de las partículas con la matriz ocurren a un nivel atómico o molecular, de manera que mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el movimiento de las dislocaciones. En consecuencia, la deformación plástica se restringe al punto que el rendimiento y la resistencia a la tracción, así como la dureza, mejoran [19].

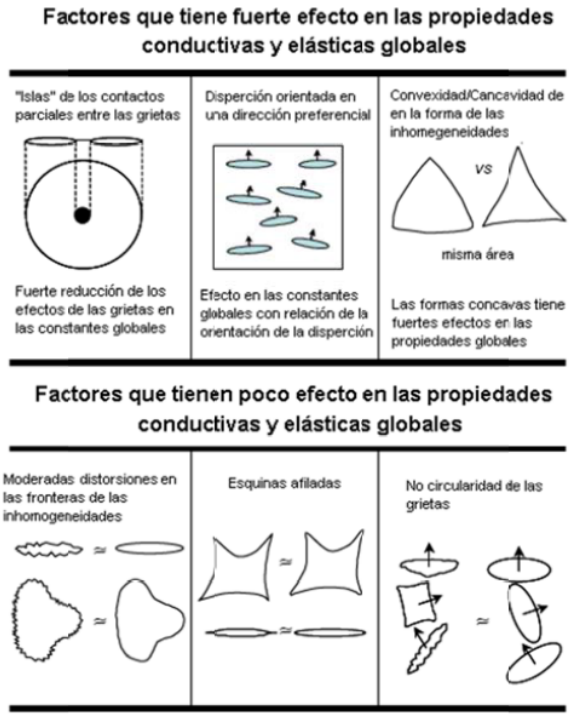


Ilustración 1.10. Factores de las inclusiones que influyen en las propiedades de los materiales compuestos reforzados con partículas.

Sin embargo, se ha estudiado que existen factores en las partículas que influyen en las propiedades de los materiales compuestos reforzados con inclusiones, los cuales se presentan en la ilustración 1.12.

La interacción entre heterogeneidades (grietas, defectos, fibras de refuerzo o partículas) ha sido objeto de investigación y diversas teorías han sido desarrolladas para determinar las propiedades efectivas del material compuesto. Entre los trabajos más destacados se encuentra el de Kerner [20] que introdujo el concepto de homogeneización para materiales de una sola fase.

En 1957 Eshelby [21] determina las propiedades del material considerando la forma de la inclusión dentro de la fase continua, y relacionó la deformación de la inclusión con la deformación de la matriz. De igual manera desarrolla el análisis de una inclusión de forma elíptica dentro de una matriz elástica para determinar afectaciones en sus propiedades; con ello propone un método básico para determinar las propiedades elásticas de un material utilizando un tensor de esfuerzos [21] [22] [23].

1.1.4.2 Nanotubos de carbono

En 1991 el físico Sumio Iijima [24] marcó el comienzo de numerosas investigaciones con su descubrimiento de los nanotubos de carbono, dichas investigaciones se han enfocado en su mayoría, en las sorprendentes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de estas nanoestructuras y su interacción con otros materiales. Estos nanotubos de carbono (NTC) han sido añadidos a matrices poliméricas con el objetivo de obtener materiales con mejores propiedades, mecánicas, térmicas o conductoras, que los materiales poliméricos que existen en la industria actualmente. Los resultados han sido alentadores y por ello muchos apuestan al desarrollo de nanocompuestos poliméricos, sin embargo para lograr que dichos materiales exhiban mejoras en sus propiedades existen dos limitantes fundamentales: la dispersión y la interacción con la matriz [25]. Parte de la limitante que se refiere a la interacción reside en la alineación de los NTC dentro de la matriz polimérica, esto debido a que tanto sus propiedades mecánicas como sus propiedades funcionales están directamente relacionadas con su dirección de alineamiento dentro de dicha matriz [5]. A pesar de todo esto los logros obtenidos en materiales poliméricos con NTC son altos en comparación a los que ya se tienen hoy en día a nivel industrial.

Los nanotubos de carbono pueden ser descritos como láminas enrolladas concéntricamente, compuestas por átomos de carbono unidos a través de hibridación sp^2, lo que permite la formación de un arreglo de tipo hexagonal de dichos átomos [25], mientras que en los extremos terminales se alternan con heptágonos y pentágonos, adquiriendo una forma parecida de semi-fullerenos. El tamaño de los NTC varía en cuanto al tamaño de sus diámetros los cuales van desde unos pocos nanómetros para los constituidos de una sola pared o también llamados de pared simple (SWNT) hasta varias decenas de nanómetros para los denominados de pared múltiple (MWNT). En la ilustración 1.13 se muestra una representación gráfica de nanotubos de carbono de pared simple y de pared múltiple.

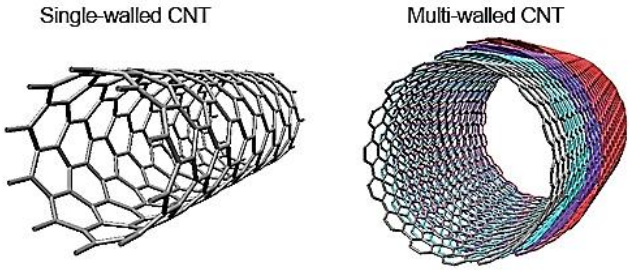


Ilustración 1.11. Estructura de NTC de pared simple (Single-walled) y de pared múltiple (Multi-walled).

Las excepcionales propiedades de los NTC son atribuidas a la resistencia del enlace C-C y a su estructura tubular, que le brinda una gran estabilidad mecánica y química. Unas de las propiedades más destacables de los SWNT conciernen a su alto módulo de Young, el cual puede alcanzar valores de entre 0.5 y $5\ TPa$ [25] [26] y resistencia a la tensión de 50 a $200\ GPa$ [27]. En contraparte, las propiedades mecánicas de los MWNT son más complejas que las de los SWNT debido a la interacción entre las múltiples capas que presenta. Se cree que las capas individuales en los SWNT deben interactuar entre sí únicamente por fuerzas de van der Waals, produciendo de esta manera deslizamiento de una capa respecto de las otras, disminuyendo el módulo elástico. En la tabla 1.2 se presentan algunas propiedades físicas de nanotubos de carbono y otros materiales [25].

MATERIAL	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)	RESISTENCIA A LA CEDENCIA $(\%)$	DENSIDAD (kg/m^3)	RELACIÓN DUREZA/PESO
SWCNT	542	65	1400	462
MWCNT	400	2.7	1800	15
Fibra de grafito	152	2.1	1600	13
Titanio	103	0.9	4.5	2
Aluminio (2024)	69	0.5	2700	2
Acero (1050)	207	0.8	7800	1

Tabla 1.2. Propiedades de NTC en comparación a otros materiales.

1.1.4.3 Diamante sintético

Debido a los altos costos de los diamantes naturales, lo cual implica una compleja selección para fabricar instrumentos con las adecuadas propiedades para cada aplicación, su uso comercial se centra en dos grandes categorías: gemas y procesos industriales; utilizando en esta última diamantes de tipo sintéticos, los cuales se aplican comúnmente en navajas de sierras, puntas de brocas, bisagras de baja fricción en las naves espaciales y como agentes pulidores.

El diamante es una forma alotrópica del carbono con una estructura *FCC* (cúbica centrada en las caras) [28] basada en orbitales híbridos sp^3 unidos por enlaces covalentes. El diamante es el material más duro conocido (dureza $Moh = 10$) aunque su tenacidad no es tan buena debido a importantes defectos estructurales.

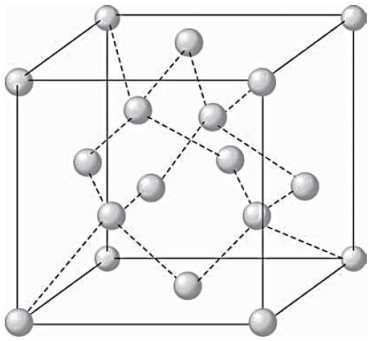


Ilustración 1.12. Estructura cristalina del diamante.

Cada átomo de carbono está tetraédricamente enlazado con los cuatro vecinos más cercanos (cristales covalentes), mientras que la longitud de enlace $C - C$ es de $0.154\ nm$.

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	$3510\ kg/m^3$
Módulo de Young	$1050\ GPa$
Resistencia a la flexión	$850\ MPa$
Dureza	$10\ Moh$
Coeficiente de expansión térmica	$1.1 \times 10^{-6}/°C$
Coeficiente de fricción	0.02
Resistividad eléctrica	$> 10^{13}\ Ohm \cdot cm$
Conductividad térmica	$W/m \cdot K$

Tabla 1.3. Propiedades del diamante.

1.1.4.4 Propiedades de los materiales compuestos

Para describir las propiedades de los materiales compuestos se necesita conocer las propiedades de sus constituyentes para determinar las del conjunto, las cuales dependen exclusivamente de cantidades relativas de las fases. Sólo algunas propiedades (densidad, volumen, pes, etc.) pueden calcularse con exactitud por medio de la regla de mezclas lo que implica el cálculo del promedio ponderado de las propiedades [29]. En el caso de la densidad de un material compuesto puede expresarse que:

$$\rho_C = \sum \varphi_i \rho_i = \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2 + \cdots + \varphi_n \rho_n \tag{1.20}$$

donde ρ_C es la densidad del compuesto, ρ_i es la densidad de cada uno de los constituyentes dentro del compuesto y φ_i corresponde a la fracción volumétrica de cada componente, de manera que $\sum \varphi_i = 1$.

En el caso de dos materiales (matriz y refuerzo) la ley de mezclas permite también obtener propiedades tales como el volumen y el peso del material compuesto que constituyen en relación a las antes mencionadas fracciones de las fases:

$$V_c = \frac{V_r}{\varphi_r} = \frac{V_m}{\varphi_m} \tag{1.21}$$

$$W_c = \frac{W_r}{w_r} = \frac{W_m}{w_m} \tag{1.22}$$

$$\varphi_r + \varphi_m = 1 \tag{1.23}$$

$$w_r + w_m = 1 \tag{1.24}$$

donde:

V_c = Volumen del compuesto.
V_r = Volumen del refuerzo.
V_m = Volumen de la matriz.

φ_r =Fracción volumétrica del refuerzo.
φ_m = Fracción volumétrica de la matriz.
w_r =Fracción en peso del refuerzo.
w_m = Fracción en peso de la matriz.

La microestructura de un material compuesto por partículas como refuerzo, se puede idealizar en forma aproximada como un modelo de inclusiones circulares en 2D y esféricas en 3D [30]. Así el volumen del compuesto se puede expresar como:

$$V_c = \frac{\pi d_p^3 N}{6\varphi_r} \tag{1.25}$$

donde d_p corresponde al diámetro de una partícula y N al número de partículas que se encuentran en el refuerzo.

1.1.5 REOLOGÍA DE SISTEMAS MULTIFÁSICOS

El comportamiento reológico de las suspensiones es extremadamente complejo, en consecuencia a los factores que intervienen en el análisis de los sistemas:

- Concentración de la fase dispersa o discreta.
- Naturaleza de la fase dispersa.
- Forma, tamaño de las partículas y distribución de la fase discreta.
- Efecto de la temperatura.
- Efecto de la presencia de aditivos.

1.1.5.1 Suspensiones diluidas

La variación de la viscosidad de la fase continua por la presencia de una fase dispersa está descrita por la ecuación de Einstein, quien demostró que la presencia de una esfera perturba el campo de flujo del fluido circundante en un campo de corte de tal manera que se disipa más energía. Este efecto incrementa la viscosidad proporcionalmente a la fracción de volumen de las partículas independientemente de su tamaño [31]:

$$\eta_i = \eta(1 + [\eta]\varphi) \tag{1.26}$$

donde η_i es la viscosidad de la suspensión, η es la viscosidad de la fase continua y $[\eta]$ se conoce como viscosidad intrínseca, que para esferas rígidas adopta un valor de 2.5; así mismo, φ es la fracción volumétrica de las partículas sólidas, i.e., representa el volumen que ocupa la fase dispersa independientemente de su fracción en peso pues en esta etapa las partículas se consideran ingrávidas [32].

El aumento de la viscosidad en la suspensión se da a consecuencia del valor dado por la fracción volumétrica φ y la viscosidad intrínseca $[\eta]$, que para partículas con forma esférica [ecuación (1.27ª)], de disco [ecuación (1.27b)] y con forma cilíndrica [ecuación (1.27c)] puede ser calculada respectivamente:

$$\text{(a)}\ [\eta] = 2.5 \qquad \text{(b)}\ [\eta] = 0.3p \qquad \text{(c)}\ [\eta] = 0.07p^{\frac{5}{3}} \qquad (1.27)$$

Esferas Discos Cilindros

donde p corresponde al cociente (mayor que la unidad) entre la longitud de la partícula a lo largo de su eje de simetría con respecto a la longitud de su eje perpendicular al primero (ilustración 1.15).

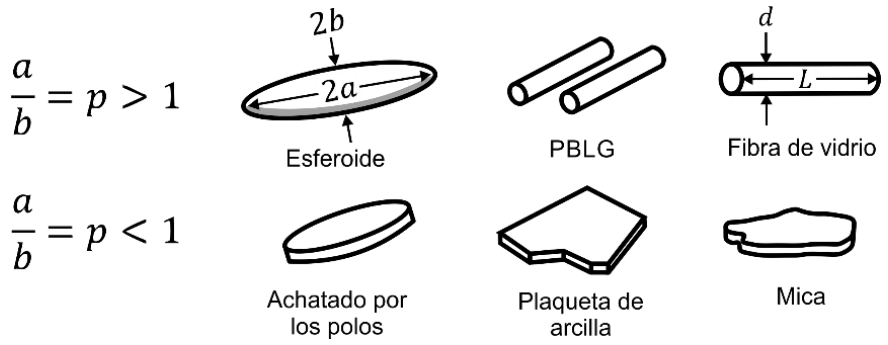


Ilustración 1.13. Cálculo de la relación de aspecto "p" para distintos tipos de partículas.

La ecuación (1.26) no admite interacción entre las partículas, pues establece que la viscosidad del medio externo es aumentada únicamente por las interacciones hidrodinámicas que introducen las partículas suspendidas y es exacta para suspensiones muy diluidas ($\varphi \leq 0.02$). La teoría de suspensiones diluidas cubre el rango por debajo del 10% del volumen de la fase continua, lo cual representa un aumento no superior al 40% en la viscosidad de la matriz [33]. La viscosidad, por lo tanto, en suspensiones diluidas es independiente del tamaño de partícula hasta un valor de $\varphi = 0.4$.

Las partículas con un tamaño pequeño tienden a estar sujetas a fuertes fuerzas de atracción debido a una elevada superficie y una distancia pequeña entre ellas. Estas fuerzas favorecen la formación de aglomerados los cuales, a su vez, repercuten en un aumento paulatino de la pseudoplasticidad hasta el punto de producir la aparición de un esfuerzo de fluencia [34]. Una posible explicación de este fenómeno radica en que las partículas aglomeradas poseen fuertes interacciones, que deben romperse para dar lugar al flujo de la suspensión.

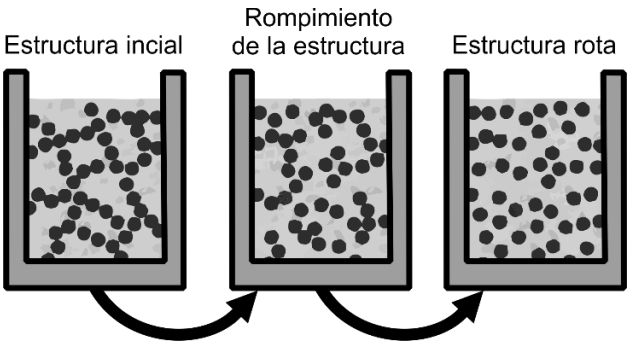


Ilustración 1.14. Proceso de rompimiento de aglomerados en la suspensión.

Para determinar la importancia de las fuerzas intermoleculares en la suspensión, Woodcock [35] propuso la existencia de una distancia promedio $\bar{h}$ entre las partículas en términos de su tamaño d_p y de su fracción volumétrica φ.

$$\frac{\bar{h}}{d_p} = \left(\frac{1}{3\pi\varphi} + \frac{5}{6}\right)^{\frac{1}{2}} - 1 \tag{1.28}$$

La ilustración 1.17 muestra la gráfica de la ecuación (1.28) para cuatro tamaños de partículas, al igual que muestra el rango de acción para cada tipo de fuerza coloidal.

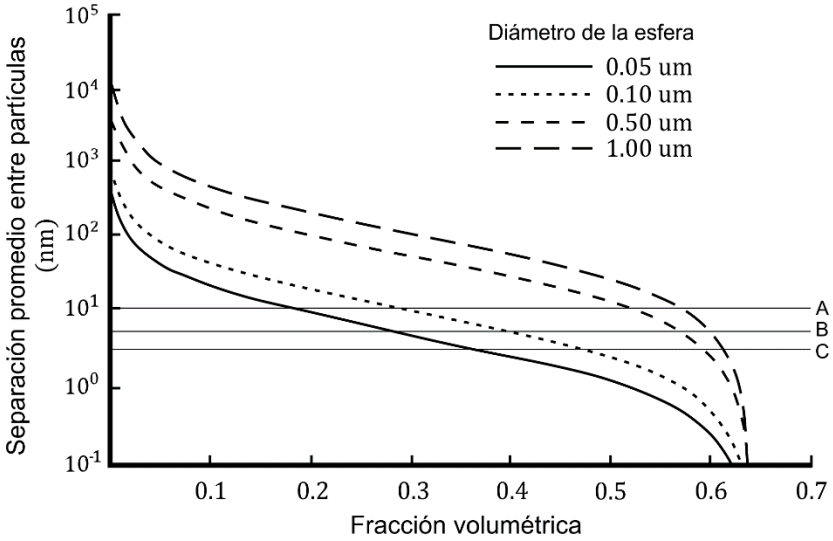


Ilustración 1.15. Separación promedio entre partículas.

Las líneas horizontales muestran el doble de la distancia sobre la que típicamente operan varias fuerzas entre partículas: (A) fuerzas electrostáticas en suspensiones acuosas; (B) fuerzas estéricas que se originan a partir de macromoléculas adsorbidas; (C) Fuerzas estéricas que se originan de detergentes no iónicos adsorbidos [33].

1.1.5.2. Distribución de partículas en la fase continua a través de tuberías.

El movimiento de partículas sólidas suspendidas en un fluido está estrechamente relacionado con la dinámica del líquido, el cual a bajos números de Reynolds tiende a comportarse de acuerdo al flujo del fluido, provocado por los efectos de la viscosidad. En este punto la gravedad y la inercia juegan un papel no muy importante al tratarse de partículas muy pequeñas. La distribución de esfuerzos cortantes debido al flujo conduce a una migración de partículas que ocurre siempre que las partículas son lo suficientemente grandes para que su movimiento relativo no sea despreciable. La velocidad de las partículas que viajan a través de una tubería depende del diámetro de la partícula y de su posición en la tubería (r_p) respecto a la línea central. Las partículas que son grandes en comparación con el tamaño de la tubería permanecen cerca del centro y se mueven aproximadamente a la velocidad promedio del fluido. En cambio, las partículas que son pequeñas en comparación con la tubería siguen de cerca el perfil de velocidad parabólica [36].

Segré y Silberberg [37] [38] describieron un efecto de separación dinámica de fluidos donde una suspensión diluida de partículas neutralmente flotantes (es decir, que poseen la misma densidad que el fluido) y que son transportadas a través de un flujo laminar en un tubo se equilibra a una distancia (r_{eq}) de $0.6R$ desde el centro del tubo. En este efecto las partículas sólidas están sujetas a fuerzas de arrastre viscosas y fuerzas de elevación inerciales. Las fuerzas de arrastre son responsables de conducir las partículas a lo largo de las líneas de flujo, mientras que las fuerzas de inercia son responsables de la migración lateral de las partículas a través de las líneas de flujo. La naturaleza parabólica del perfil de velocidad laminar en el flujo de Poiseuille produce una fuerza de elevación inercial inducida por un esfuerzo cortante que impulsa las partículas hacia las paredes del canal. A medida que las partículas migran más cerca de las paredes del canal, el flujo alrededor de la partícula induce un aumento de presión entre la partícula y la pared, lo que evita que las partículas se acerquen [39]. En la ilustración 1.18 se incluye la descripción del movimiento de una partícula en flujo laminar a través de una tubería.

Segré y Silberberg determinaron que las fuerzas de elevación opuestas dependen de la relación del radio de la partícula al radio del canal (r_p/R) y son dominantes en el rango de $0.07 < r_p/R > 0.15$, con números de Reynolds Re de 3.2 a 173.

Bauckhage [40] experimentó variando el número de Reynolds y la relación r_p/R, y observó su influencia en la posición de equilibrio r_{eq} de la partícula. Encontró que bajo la condición de $36 < Re < 1000$ la posición de equilibrio corresponde a la relación:

$$\frac{r_{eq}}{R - r_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} + 0.064 \ln\left(\frac{Re}{36}\right) \tag{1.29}$$

y que para $1 < Re < 36$ se reduce a:

$$\frac{r_{eq}}{R} = \left(1 - \frac{r_p}{R}\right)\frac{1}{\sqrt{2}} \tag{1.30}$$

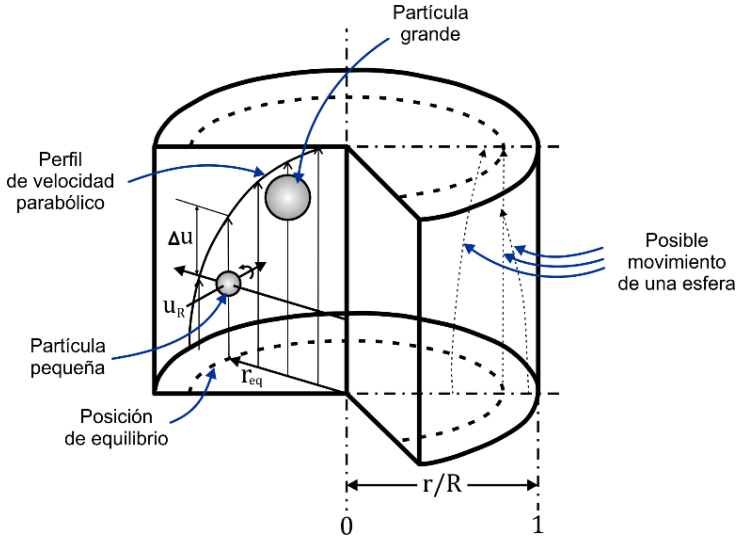


Ilustración 1.16. Movimiento de una partícula en flujo laminar debido a interacciones hidrodinámicas.

1.1.6 FUERZAS INTERMOLECULARES

Las fuerzas entre objetos macroscópicos son el resultado de una interacción compleja entre las moléculas en los dos objetos y el medio de separación de ellos [41]. Estas fuerzas intermoleculares siempre se encuentran expresadas en términos de las funciones potenciales de energía, y aunque no existe un potencial de interacción universal entre partículas, una expresión muy adecuada a la hora de reproducir potenciales de interacción es el denominado *potencial de Lennard-Jones*:

$$U(h) = 4\varepsilon\left[\left(\frac{\sigma}{h}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{h}\right)^{12}\right] \tag{1.31}$$

Si la ecuación (1.31) se deriva con respecto a la distancia entre dos partículas interactuando (h), la fuerza de van der Waals entre ellos corresponde a:

$$F(h) = 24\frac{\varepsilon}{\sigma}\left[2\left(\frac{\sigma}{h}\right)^{13} - \left(\frac{\sigma}{h}\right)^{7}\right] \tag{1.32}$$

donde $\varepsilon = 7.459734087 \times 10^{-22}\, J$ y $\sigma = 0.3825\, nm$ para átomos de carbono [42]. A distancias pequeñas, el potencial es fuertemente repulsivo, representando el solapamiento de las nubes electrónicas de los átomos. A distancias grandes, en cambio, el potencial es atractivo representando la atracción de van der Waals. Sin embargo, el potencial usualmente se trunca a partir de una distancia equivalente a 2.5σ sin incurrir en una pérdida significativa de precisión, esto quiere decir que no se evalúan interacciones más allá de esa distancia [43].

1.1.6.1 Fuerzas de van der Waals

Este tipo de interacciones, de naturaleza cohesiva, ocurren cuando las moléculas están muy próximas y sus energías libres varían de acuerdo a una distancia de separación h entre sus centros.

En 1912 Keesom consideró la existencia de un efecto de orientación entre moléculas neutras polares que presentan dipolos permanentes. La cohesión entre las moléculas sería justificada con la atracción electroestática de dichos dipolos orientados:

$$W = -\frac{C_{Keesom}}{h^6} \tag{1.33}$$

Sin embargo, Debye consideró que las predicciones del efecto de orientación no concordaban exactamente con la realidad y por esta razón consideró que una molécula con dipolo permanente podía inducir un dipolo en otra molécula no polar. De esta manera el efecto electroestático se vería incrementado.

$$W = -\frac{C_{Debye}}{h^6} \tag{1.34}$$

Los dos efectos anteriores son válidos en sólidos o líquidos con moléculas polares pero no son útiles para describir el comportamiento de moléculas que no poseen momento dipolar permanente. Para ello London consideró un efecto de dispersión asociado con la polarización dinámica de la molécula. Aquí los electrones en cada molécula crean dipolos transitorios puesto que en un instante dado dichos electrones no estarían distribuidos con la alta simetría correspondiente a un gran periodo de tiempo:

$$W = -\frac{C_{London}}{h^6} \tag{1.35}$$

De esta manera, el dipolo instantáneo es capaz de polarizar a sus vecinos tal como ocurre en el efecto de inducción. Para estimar la fuerza de van der Waals basta con sumar todos los términos que consideran interacciones dipolo-dipolo [44]:

$$C_{vdW} = C_{AB} = C_{Keesom} + C_{Debye} + C_{London} \tag{1.36}$$

$$W_{vdW} = -\frac{C_{vdW}}{h^6} \tag{1.37}$$

1.1.6.2 Constante de Hamaker

Para sistemas de unidades múltiples se supone que las moléculas interactúan mutuamente de acuerdo con el potencial de Lennard-Jones, y que la interacción total es la suma de todas las interacciones individuales. La constante de Hamaker A_H depende de las propiedades de los materiales (e.g. permitividad dieléctrica, densidad de carga, densidad de masa) y del medio que interviene [45].

$$A_H = \pi^2 \rho_A \rho_B C_{AB} \tag{1.38}$$

Las leyes de interacción resultantes para algunas geometrías comunes se muestran en la tabla 1.4, dadas en términos de la constante de Hamaker. La fuerza F negativa implica atracción cuando A_H es positiva; así cuando F es positiva, A_H es negativa y describe una fuerza repulsiva.

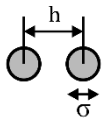
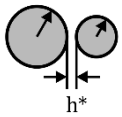
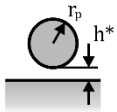
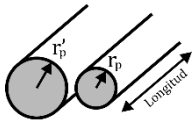
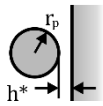
GEOMETRÍA		INTERACCIÓN DE VAN DER WAALS	
		Energía (W)	Fuerza ($-dW/dh$)
Dos átomos o moléculas pequeñas		$-\frac{C}{h^6}$	$-\frac{6C}{h^7}$
Dos esferas o macromoléculas		$-\frac{A_H}{6h^*}\left(\frac{r_{p1}r_{p2}}{r_{p1}+r_{p2}}\right)$	$-\frac{A_H}{6(h^*)^2}\left(\frac{r_{p1}r_{p2}}{r_{p1}+r_{p2}}\right)$
Esfera o macromolécula cerca de una superficie		$-\frac{A_H r_p}{6h^*}$	$-\frac{A_H r_p}{6(h^*)^2}$
Dos cilindros paralelos (por unidad de longitud)		$-\frac{A_H}{12\sqrt{2}(h^*)^{3/2}}\left(\frac{r_{p1}r_{p2}}{r_{p1}+r_{p2}}\right)^{1/2}$	$-\frac{A_H}{8\sqrt{2}(h^*)^{5/2}}\left(\frac{r_{p1}r_{p2}}{r_{p1}+r_{p2}}\right)^{1/2}$
Cilindro cerca de una superficie (por unidad de longitud)		$-\frac{A_H\sqrt{r_p}}{12\sqrt{2}h^{*3/2}}$	$-\frac{A_H\sqrt{r_p}}{8\sqrt{2}(h^*)^{5/2}}$

Tabla 1.4. Energía de interacción y fuerza entre cuerpos macroscópicos de diferentes geometrías en términos de la constante de Hamaker.

1.1.6.3 Adhesión

Cuando dos cuerpos, bajo la acción de una carga, se encuentran en contacto mecánico, las fuerzas de atracción superficiales conducen a la adhesión. Este fenómeno que se describe como la fuerza máxima necesaria para separar dos cuerpos, dependerá de la fuerza de la interacción atractiva, el área de contacto entre los cuerpos y la distancia mínima entre ellos [44]. La energía libre superficial γ (*ELS*) es la propiedad de los materiales que se refiere a los átomos situados en la superficie libre. Dado que la adhesión es función de la energía libre superficial, si un enlace se forma entre dos materiales con *ELS* γ_A y γ_B, la energía de superficie de la interface por unidad de área cambia a γ_{AB}. Entonces, el trabajo de adhesión puede expresarse como:

$$W_{adh} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \tag{1.39}$$

CAPÍTULO DOS ▪ Procedimiento

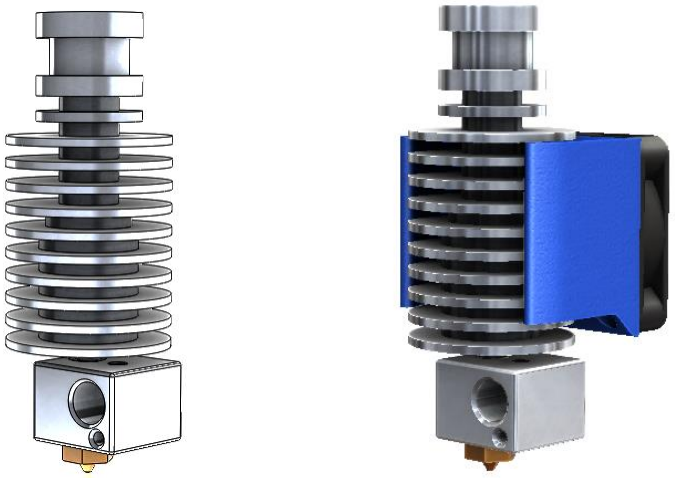
2.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL DISIPADOR DE CALOR

A consecuencia de la gran cantidad de comentarios en foros por parte de la comunidad de aficionados a las impresiones 3D, se consideró el cambio del extremo caliente al llamado *E3D-v5* de la marca británica *E3D*. Algunas de las comparaciones más destacables entre los extremos calientes *Hexagon* y *E3D-v5* se enlistan en la tabla 2.1.

HEXAGON		***E3D-V5***	
Pros	*Contras*	*Pros*	*Contras*
Tamaño compacto, ideal para impresoras pequeñas. El elemento de fundición incluye una carcasa de silicona para disminuir las pérdidas de calor.	Tiende a sufrir bloqueo de material dentro del elemento de fundición. No cuenta con soporte para el ventilador. El disipador de calor no resulta del todo eficiente.	Alta eficiencia en el disipador de calor el cual permite alcanzar altas temperaturas de operación. El ventilador cuenta con soporte especial para una incidencia directa hacia el disipador de calor.	Mayor tamaño lo que repercute en la disminución de la altura de impresión.

Tabla 2.1. Comparación entre *hotends*: *Hexagon* y *E3D-v5.*

Si bien existe un modelo más reciente (*E3D-v6*) en el mercado, la gran similitud de la versión *E3D-v5* con el disipador de calor del extrusor *BCNozzle* (distribuido por la empresa *BCN3D Technologies*) determinó su implementación en el presente estudio pues esta cuenta con respaldo experimental y de análisis de elemento finito en su diseño en cuanto a la eficiencia del disipador de calor. De igual manera Jerez Mesa *et al* [46] analizaron la distribución de temperaturas (modelo *E3D-v6*) debido a la interacción del ventilador sobre el disipador, similar a como se muestra en el modelo de la ilustración 2.1b.



(a) (b)

Ilustración 2.1. *Hotend* modelo *E3D-v5*, geometría del disipador de calor (a) e implementación del ventilador a través del soporte incluido (b).

Adicionalmente se llevó a cabo un análisis térmico para comprobar el comportamiento térmico de los dos extrusores en situaciones idénticas para ambos. Dicha simulación fue realizada en el software *SOLIDWORKS Premium 2016* con las siguientes condiciones:

- Se supone un proceso de convección natural. En ambos modelos se omite la convección forzada, causada por el funcionamiento del ventilador.
- Se omite el paso del filamento, es decir, se hace un análisis en vacío, sin material dentro.
- El cartucho responsable de proveer el calor es el mismo en ambos casos ($40\ W$ de potencia) y se supone una temperatura constante en toda su superficie.
- Se toma en consideración la acción de la gravedad con el fin de simular la circulación de aire caliente sobre las superficies debido a las diferencias en temperatura.

Una vez determinadas las condiciones para realizar la simulación, fue necesario utilizar dos complementos dentro de la paquetería de *SOLIDWORKS*: *Flow Simulation* y *Simulation* (análisis térmico). Con *Flow Simulation* se realizó el cálculo para obtener los coeficientes de transferencia de calor por convección por aire (h_{conv}) a consecuencia del cartucho calentador. Posteriormente los datos obtenidos se exportaron al complemento *Simulation* para un análisis térmico con el objetivo de visualizar los perfiles de distribución de temperatura en ambos extrusores y la eficiencia con la cual cumplen su función los disipadores de calor. Las fichas técnicas de ambos extrusores se presentan en el apéndice A.

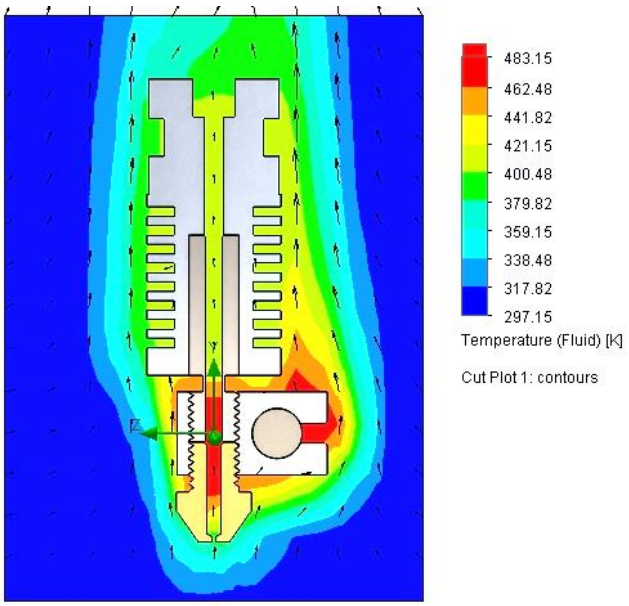


Ilustración 2.2. Temperatura del aire circundante al rededor del *hotend* modelo *Hexagon*.

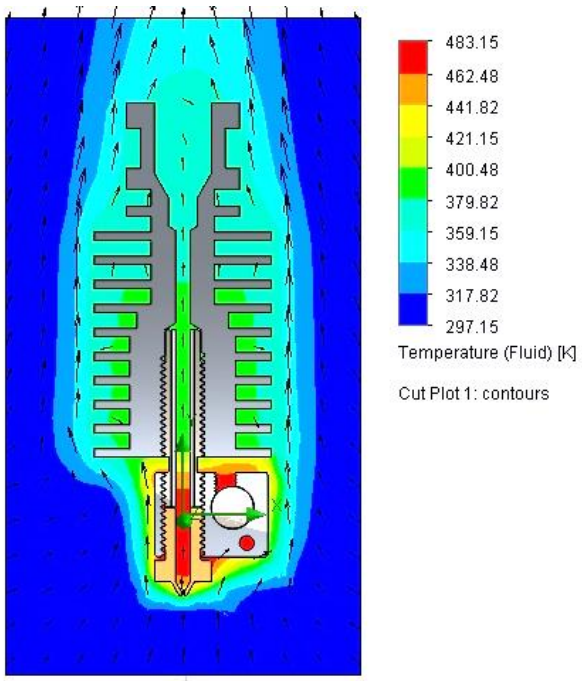


Ilustración 2.3. Temperatura del aire circundante al rededor del *hotend* modelo *E3D-v5*

La distribución de temperaturas del aire circundante obtenidas en las ilustraciones 2.2 y 2.3 muestran una clara diferencia en el funcionamiento de ambos modelos sometidos a temperaturas de funcionamiento del cartucho calentador idénticas. De igual manera *FlowSimulation* permitió calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección promedio (h_{conv}) de ambos disipadores de calor obteniendo así los valores de $25.952\ W/m^2 \cdot K$ para el modelo *Hexagon* y $31.845\ W/m^2 \cdot K$ para el modelo *E3D-v5*.

2.2 PROPUESTA DE DISEÑO DEL BLOQUE DE FUNDICIÓN

Para el diseño del bloque de fundición se consideró incluir la boquilla en el mismo para evitar de esa manera posibles atascos de material debido a desajustes entre los elementos. Esto proporcionó la posibilidad de mantener un tamaño similar al modelo E3D-v5 con el fin de mantener las dimensiones de impresión del equipo. Un bosquejo de la geometría del interior del diseño propuesto es presentado en la ilustración 2.4.

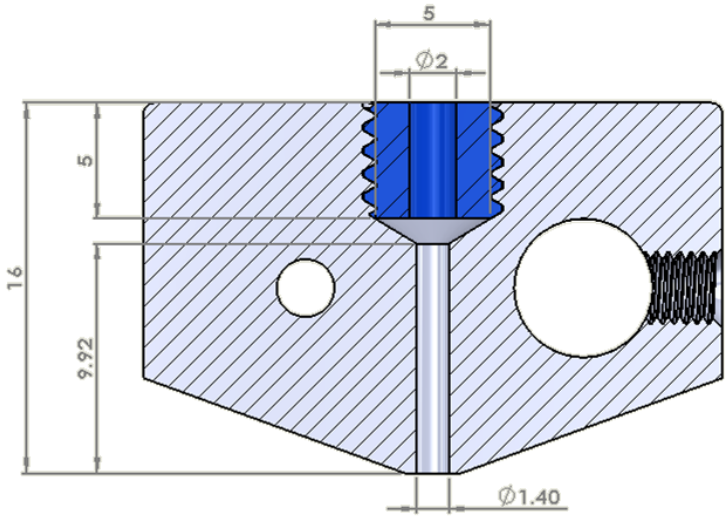


Ilustración 2.4. Propuesta de diseño del bloque de fundición.

La zona de color azul muestra parte del elemento conocido como garganta, el cual servirá de unión entre el bloque de fundición y el disipador de calor del modelo E3D-v5. Así el bloque contará con tres zonas para el análisis del filamento fundido. La modificación del diámetro de la boquilla no presenta mayor relevancia que para facilitar el maquinado del bloque.

El material seleccionado corresponde a aluminio 6061-T6, debido a su facilidad de maquinado otorgando buenas características de acabado necesarias para el correcto paso de la masa fundida a extruir. El valor típico de conductividad térmica para esta aleación se encuentra alrededor de los $173\ W/m \cdot K$, permitiendo así una temperatura lo más homogénea posible en todo el bloque. Además, gracias a su baja densidad ($2.7\ g/cm^3$) el peso del bloque no será lo suficientemente grande para provocar desajustes en la impresora, como ocurre en algunos equipos producto de la inercia de los elementos a causa del movimiento del cabezal.

2.3 COMPORTAMIENTO DE LA FASE CONTINUA EN EL EXTRUSOR

Mackay *et al* [47] definieron una velocidad máxima de alimentación para la cual el filamento se vuelve mecánicamente inestable (pandeo del filamento, sección 1.1.2.1). Análogamente, se buscó calcular una velocidad máxima considerando el cambio en la viscosidad del PLA fundido a consecuencia de una segunda fase y el cambio de la geometría del elemento de fundición. Retomando la ecuación (1.4) del esfuerzo máximo que soporta el filamento a la entrada del *hotend* se tiene que:

$$\sigma_{lím} = \frac{\pi E d_f^2}{16 L_f^2} \qquad [2.1]$$

en donde las propiedades mecánicas y geométricas del filamento corresponden a:

$$E = 3.5\ GPa \qquad d_f = 1.75\ mm \qquad L_f = 80.2\ mm$$

El comportamiento reológico del ácido poliláctico tiene un profundo efecto durante su fundición en la etapa de procesamiento. En general, para altos pesos moleculares, se cuenta con viscosidades del orden de 500 a $1000\ Pa \cdot s$ en velocidades de corte de 10 a $50\ s^{-1}$ [48]. Debido a su condición no newtoniana, el PLA fundido, presenta un comportamiento pseudoplástico descrito en la sección 1.1.2.2, con un índice $n < 1$. Al realizar un análisis de regresión no lineal en las ecuaciones de la ley de potencia, Fang y Hanna [49] describen las ecuaciones acerca de la viscosidad del PLA en función de la velocidad de corte, la temperatura y su estructura molecular:

PLA	TEMPERATURA	ECUACIÓN
Amorfo	$150\ °C$	$\eta = 649386\dot{\gamma}^{-0.8332}$ [2.2]
Semicristalino	$170\ °C$	$\eta = 609159\dot{\gamma}^{-0.8134}$ [2.3]

Tabla 2.2. Viscosidad del PLA según la ley de potencia.

Sin embargo, se optó por utilizar el modelo de Cross-WLF para calcular la viscosidad del PLA debido la dependencia a la temperatura implícita en la ecuación. Este modelo es implementado por el software *Moldflow* para simulaciones de moldeo por inyección:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{(1-n)}} \qquad (2.2)$$

donde:

$$\eta_0 = B1exp\left[\frac{-A1(T-T^*)}{A2+(T-T^*)}\right], \quad T^* = B2 + (B3 \cdot P)$$

$A1 =$	20.194	$B1 =$	$3.31719 \times 10^9\ Pa \cdot s$
$A2 =$	$51.6\ K$	$B2 =$	$373.15\ K$
$n =$	0.25	$B3 =$	$0\ K/Pa$
$\tau^* =$	$1.00861 \times 10^5\ Pa$		

El modelo de Cross-WLF se utilizó para calcular la viscosidad del filamento fundido de acuerdo a las variaciones de temperatura dentro del elemento de fundición. Puesto que la no linealidad del modelo se incluye dentro de la viscosidad, es posible relacionarla con el esfuerzo de corte de acuerdo a la ley de Newton:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \tag{2.3}$$

La ecuación (2.3) permite simplificar el análisis del balance de fuerzas (sección 1.1.2.3) sobre un volumen de control. El desarrollo de las ecuaciones se encuentra en la literatura [15] de acuerdo a los componentes representados en la ilustración 2.5.

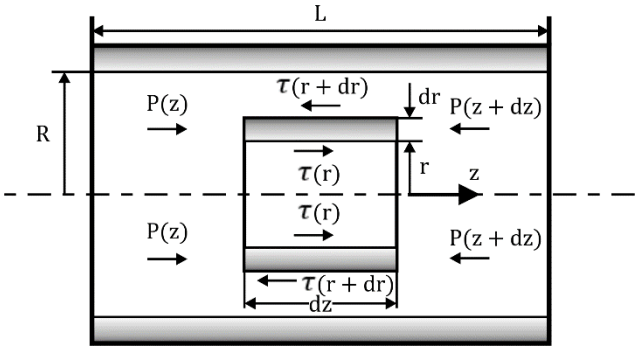


Ilustración 2.5. Balance de fuerzas que actúan sobre un volumen de control durante el flujo a través de una tubería.

$$\tau(r) = \frac{\Delta P \cdot r}{2L} \tag{2.4}$$

La ecuación (2.6) es resultado del análisis descrito por Michaeli [15], en donde se considera únicamente el balance de fuerzas en el volumen de control, es decir, que la dependencia lineal del esfuerzo cortante es independiente del comportamiento del material. Para incluir dicho comportamiento, basta con relacionar al esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidades (dv_z/dr) y de la viscosidad (η):

$$\tau = -\eta \frac{dv_z}{dr} \tag{2.5}$$

donde $-\frac{dv_z}{dr}$ es igual a la velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (el signo negativo indica que la velocidad v_z decrece en dirección de r). De manera que si se sustituye (2.5) en (2.4) se tiene que:

$$-\eta \frac{dv_z}{dr} = \frac{\Delta P \cdot r}{2L} \tag{2.6}$$

$$dv_z = -\frac{\Delta P \cdot r}{2L\eta} dr \tag{2.7}$$

Para la integración de la ecuación (2.7) se considera que no existe deslizamiento en las paredes de la tubería (i.e., $v_z = 0$ cuando $r = R$), entonces, la distribución de velocidades en la sección transversal de la tubería es dada por la ecuación (2.8).

$$v_z(r) = \frac{\Delta P \cdot R^2}{4L\eta}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \tag{2.8}$$

La velocidad máxima $v_{máx}$ puede ser deducida cuando $r = 0$, mientras que la velocidad promedio v corresponde a la mitad de la velocidad máxima:

$$v_{máx} = \frac{\Delta P \cdot R^2}{4L\eta} \tag{2.9}$$

$$v = \frac{\Delta P \cdot R^2}{8L\eta} \tag{2.10}$$

En términos del flujo volumétrico Q, se podría expresar al igual que en la ecuación (1.19), conocida como la ley de Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \tag{2.11}$$

El análisis descrito anteriormente sólo resulta válido para secciones circulares constantes sin variaciones en su sección transversal. De acuerdo a Michaeli [15], el conjunto de términos $\pi R^4/8L$ se denomina como conductancia de la matriz de extrusión (que recíprocamente se conoce como resistencia de dicha matriz), y esta depende de la geometría de la sección. En la tabla 2.3 se muestra la equivalencia de la conductancia K de acuerdo al tipo de geometría que se ha de utilizar en el diseño del *hotend*.

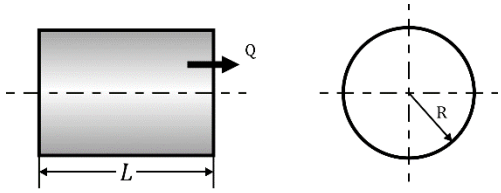
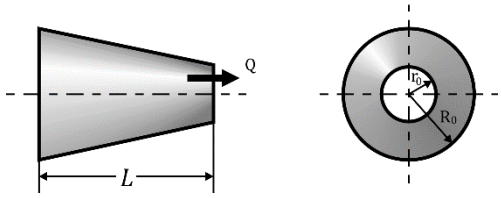
GEOMETRÍA	CONDUCTANCIA (K)
Circular 	$K = \frac{\pi R^4}{8L}$ (2.12)
Cónica 	$K = \frac{\pi r_0^4}{8L} \cdot \frac{3\left(\frac{R_0}{r_0} - 1\right)}{1 - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^3}$ (2.13)

Tabla 2.3. Conductancia de secciones circulares y cónicas.

Entonces, si la presión total en el elemento caliente corresponde a la suma de las diferencias de presión en sus secciones [ecuación (1.18)], se obtiene que:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q \cdot \eta}{K_i} = Q \cdot \eta \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \cdots + \frac{1}{K_n} \right) \tag{2.14}$$

La ecuación (2.14) permite determinar la presión total en el sistema, para luego ser comparada con el esfuerzo límite que es capaz de soportar el filamento como se presentó en la ecuación (1.5). Con esta consideración la ecuación resultaría como sigue:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q \cdot \eta}{K_i} = \frac{\sigma_{lím}}{1.1} \tag{2.15}$$

La ecuación (2.15) muestra la importancia de fijar una velocidad límite para la alimentación del filamento dentro del *hotend*. Puesto que la geometría está dada por la ilustración 2.6 se tiene que:

$$\Delta P = Q \cdot \eta \left[\frac{8L_1}{\pi R_1} + \frac{8L_2\left(1 - \frac{R_3^3}{R_2^3}\right)}{3\pi R_3^4\left(\frac{R_2}{R_3} - 1\right)} + \frac{8L_3}{\pi R_3} \right] \tag{2.16}$$

donde $L_{1,2,3}$ y $R_{1,2,3}$ se especifican en la ilustración 2.6

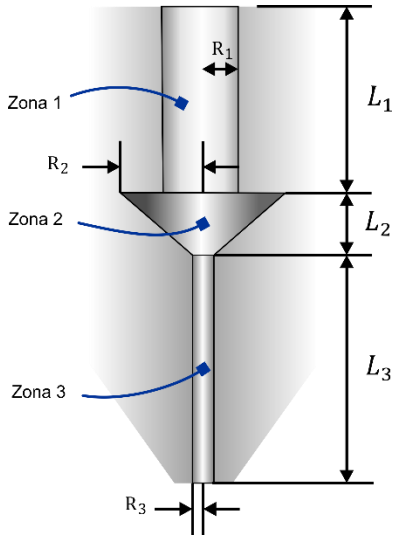


Ilustración 2.6. Geometría del interior del bloque de fundición.

$$Q \cdot \eta = 2.0379 \times 10^{-4} \left(N \cdot m/_s\right) \tag{2.17}$$

Puesto que la viscosidad se determinó en función de la temperatura es necesario recurrir al análisis térmico realizado en el extrusor E3D-v5 ya que las dimensiones entre ese modelo y el presente diseño tienen variaciones mínimas y el gradiente de temperaturas en el bloque de fundición no es significativo. Este análisis se presenta en la ilustración 2.7.

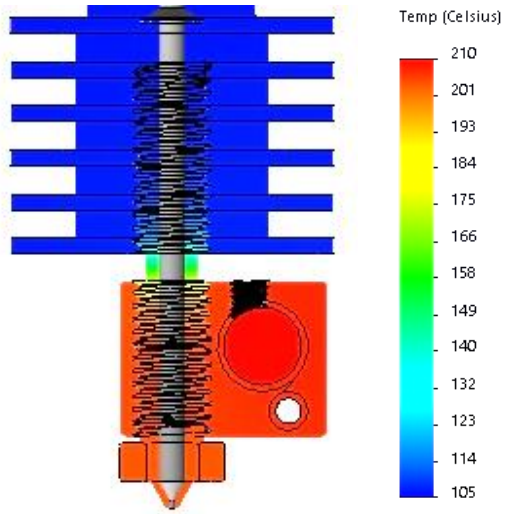


Ilustración 2.7. Distribución de temperaturas en el *hotend*.

Al fijar la temperatura de funcionamiento a $205\ °C$ (valor establecido por defecto en el software de impresión utilizado por la impresora) la viscosidad determinada por la ecuación de Cross-WLF es:

$$\eta = \frac{4369.2453}{1 + (0.0433\dot{\gamma})^{0.75}} \tag{2.18}$$

Barnes [33] establece un rango típico de velocidad de corte para procesos de extrusión, el cual va de 10^0 a $10^2\ s^{-1}$.

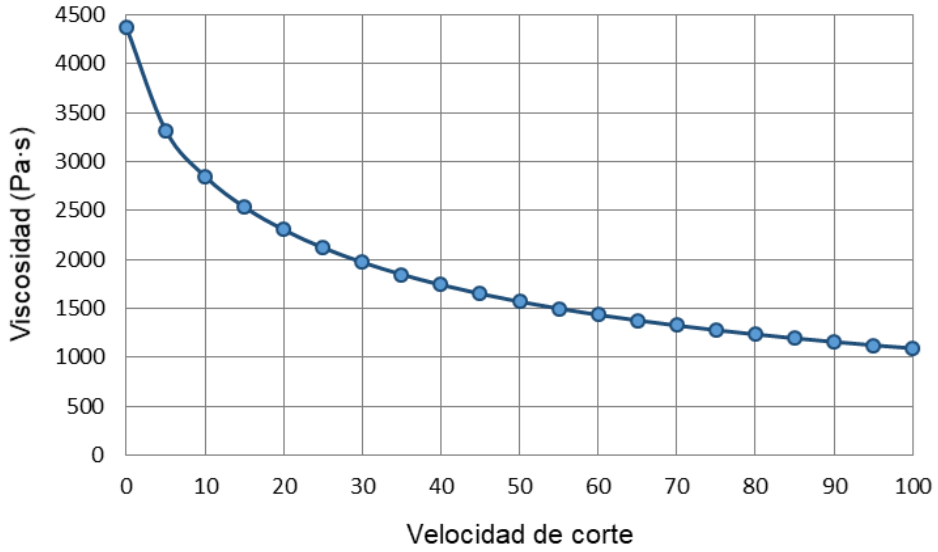


Ilustración 2.8. Comportamiento viscoso del fluido dependiente de la velocidad de corte.

En la ilustración 2.8 se aprecia la dependencia de la viscosidad a la velocidad de corte mientras que en la ilustración 2.9 se relaciona la velocidad de corte contra el esfuerzo cortante, reafirmando así el comportamiento pseudoplástico de la masa fundida.

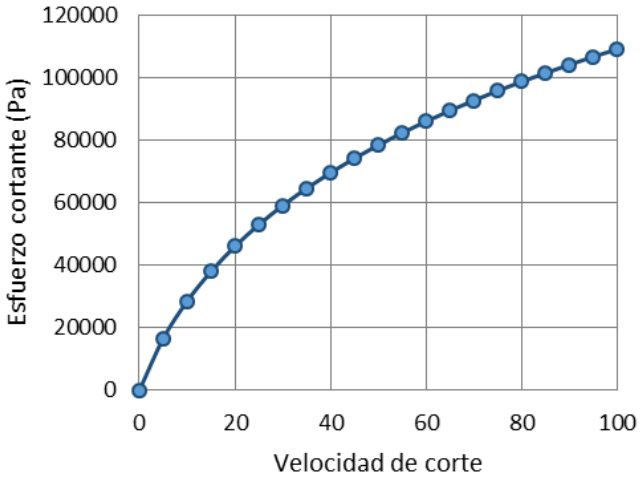


Ilustración 2.9. Comportamiento pseudplástico del PLA dentro del bloque de fundición.

La velocidad de corte $\dot{\gamma}$ se relaciona con el flujo volumétrico y el diámetro de la sección por donde circula el fluido mediante la ecuación (2.19):

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi d^3} \tag{2.19}$$

De acuerdo a la ecuación anterior se tiene que con un diámetro de sección pequeño la velocidad de corte habrá de resultar en valores más altos que con un diámetro de sección mayor, sin embargo el esfuerzo cortante se incrementa al igual que la presión dentro de la sección. Por esta razón se propusieron valores de velocidades en la zona 3, para aproximar una velocidad crítica de extrusión en el límite del esfuerzo que es capaz de soportar el filamento descrito por la ecuación (2.15). La tabla 2.4 muestra algunos valores obtenidos con las velocidades de extrusión propuestas, considerando que $\Delta P = 297.4628\ kPa$.

$v_3\ (m/s)$	$Q\ (m^3/s)$	$\dot{\gamma}\ (s^{-1})$	$\eta\ (kPa \cdot s)$	$\Delta P\ (kPa)$
0	0	0	4.3692	0
0.01	3.14×10^{-8}	14.5773	2.5579	117.2945
0.02	6.28×10^{-8}	29.1545	1.9942	182.8939
0.03	9.42×10^{-8}	43.7318	1.6713	229.9224
0.04	1.26×10^{-7}	58.3090	1.4550	266.8801
0.05	1.57×10^{-7}	72.8863	1.2973	297.4560

Tabla 2.4. Valores propuestos para la velocidad de extrusión y su influencia en el material fundido.

Lo anterior demuestra que la velocidad límite de extrusión es de aproximadamente $0.05\ m/s$, que resulta, según la ley de continuidad, en una velocidad máxima de alimentación de filamento de $0.0245\ m/s$.

La interfaz que utiliza la impresora para comunicarse con el usuario (*MatterControl*), otorga la posibilidad de configurar la altura de capa H del filamento extruido, por lo tanto:

$$H_{máx} = 2.2428\ mm \tag{2.20}$$

sin embargo, el comportamiento reológico cambia en un material compuesto y se vuelve necesario el análisis de la fase dispersa, como se presenta a continuación.

2.4 ANÁLISIS DE LA SEGUNDA FASE

Puesto que el proyecto está basado en extrusión de materiales compuestos, la segunda fase juega un papel primordial, el cual será discutido en esta sección.

Como se vió anteriormente la viscosidad del sistema es la propiedad en la que repercute principalmente la inclusión de una segunda fase. Cabe recalcar que dicho sistema es tratado como una suspensión de partículas sólidas e indeformables de diminutos tamaños del orden de nanómetros y algunos micrómetros, lo que le otorga la categoría de un sistema de tipo coloidal.

Con el objetivo de simplificar el análisis, las siguientes condiciones son de gran ayuda a fin de cumplir con los objetivos propuestos:

- Las partículas en suspensión están diluidas en la fase continua, esto con el fin de despreciar las interacciones electroestáticas entre partículas, y de igual manera evitar los efectos hidrodinámicos que pudieran desarrollar las partículas entre sus vecinas más cercanas.
- El fluido se considera con bajos números de Reynolds (Re), a pesar de la necesidad de utilizar métodos de dispersión en las partículas lo cual podría repercutir en un cambio en el régimen del fluido, se considera laminar debido a que un análisis de sistemas multifásicos en régimen turbulento queda fuera del alcance de un proyecto a nivel licenciatura.
- La suspensión es monodispersa (contiene un solo componente en la fase discontinua) y sus partículas no se deforman como en el caso de las emulsiones.
- La fracción volumétrica de las partículas en suspensión debe cumplir con un límite de $\varphi \leq 0.4$, pues en suspensiones diluidas, la viscosidad es independiente del tamaño de las partículas. Sin embargo, la fracción volumétrica requerida debe ser $\varphi \leq 0.02$ para así recurrir a la ecuación (2.21) antes vista en la sección 1.1.5.1:

$$\eta_c = \eta(1 + [\eta]\varphi) \tag{2.21}$$

donde η_c corresponde a la viscosidad del material compuesto; η a la viscosidad del PLA y $[\eta]$ es la viscosidad intrínseca que, según la ilustración 1.15, varía dependiendo la forma de la partícula.

Las dimensiones de las partículas utilizadas en este proyecto son dadas por los fabricantes y se presentan en la tabla 2.5 junto con su respectiva viscosidad intrínseca $[\eta]$.

MATERIAL	GEOMETRÍA DE LA PARTÍCULA		$[\eta]$
Nanotubos de carbono (SWNT)	Cilíndrica	$d_{NTC} = 4\ nm$ $L_{NTC} = 2\ \mu m$ $p = 500$	2204.8618 *(Ec. 1.27)*
Diamante compuesto	Esférica (idealizada)	$d_{p\ (D)} = 4 - 6\ \mu m$	2.5

Tabla 2.5. Materiales utilizados en el presente trabajo.

Sin embargo, la viscosidad intrínseca obtenida con la ecuación (1.27c) no resulta conveniente al analizar los nanotubos de carbono por la alta relación de aspecto que estos presentan ($p = 500$), por lo que se requiere una relación que trate a este material como "fibras".

Bounoua [50] explica la relación de la viscosidad para fibras dependiendo de la relación de aspecto, la fracción volumétrica y una constante numérica ($\beta = 1.554$). Por lo que la ecuación, en regímenes de suspensiones diluidas y semidiluidas, resulta:

$$\eta_c = \eta \left\{ 1 + \varphi \frac{\beta \cdot p}{\pi \left[\ln \frac{1}{\varphi} + \ln \left(\ln \frac{1}{\varphi} \right) + 0.1585 \right]} \right\} \tag{2.22}$$

Ya que el límite de la fracción volumétrica de la fase dispersa tiene que ser $\varphi \leq 0.02$, se considera a tal valor como el 2% del total del material compuesto. De esta manera en las ilustraciones 2.10 y 2.11 se describe la variación de la viscosidad respecto al porcentaje en volumen de la fase dispersa.

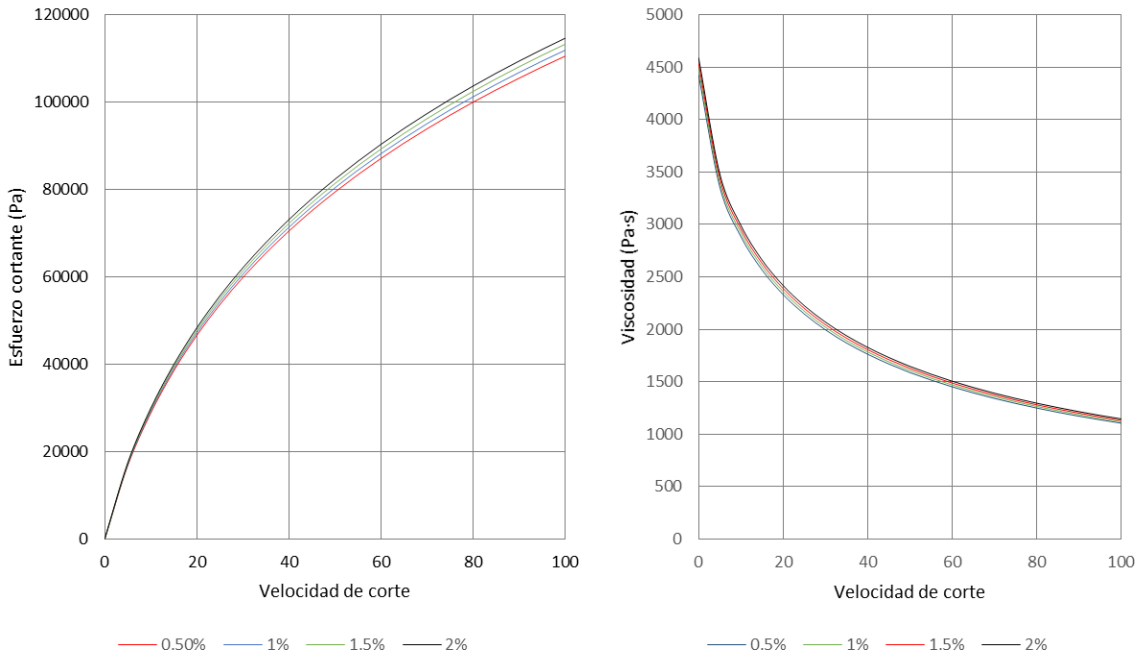


Ilustración 2.10. Influencia de las partículas de diamante en el comportamiento reológico del PLA.

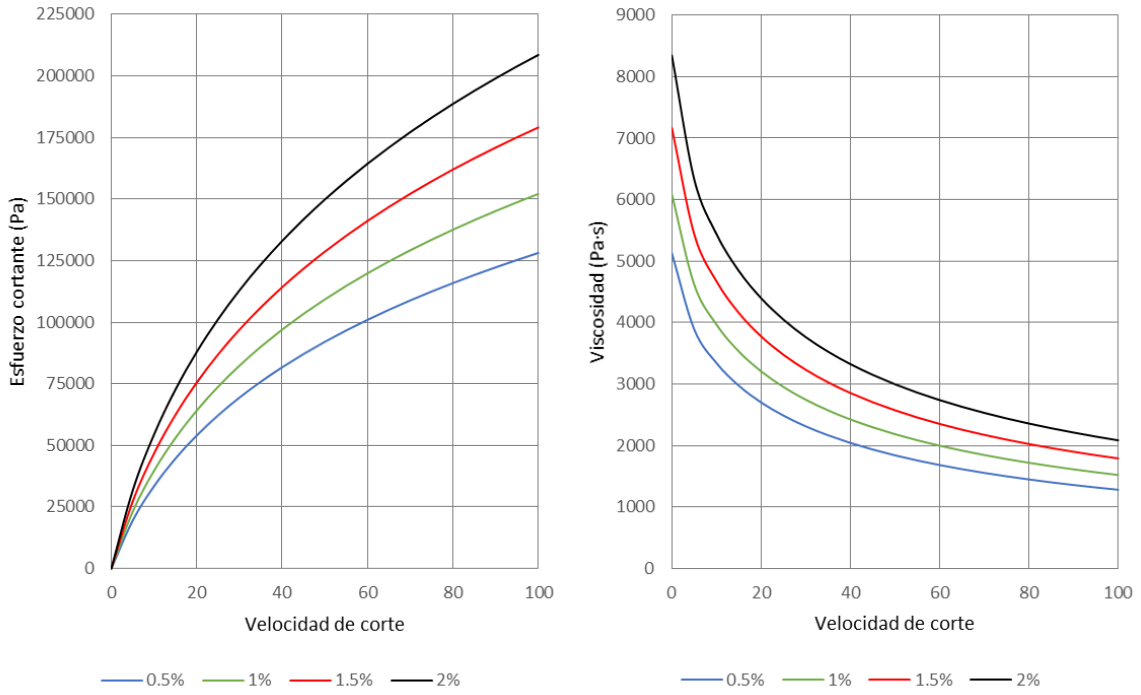


Ilustración 2.11. Influencia de los NTC en el comportamiento reológico del PLA.

Contrariamente a lo que sucede con las partículas de diamante, el porcentaje de nanotubos de carbono dentro de la matriz influye en gran medida en el comportamiento reológico de la masa fundida, la cual originalmente se comporta como en las ilustraciones 2.8 y 2.9.

Finalmente las ecuaciones que rigen el comportamiento reológico del material compuesto se describen a continuación:

$$\eta = \frac{4369.2453}{1 + (0.0433\dot{\gamma})^{0.75}} \cdot (1 + 2.5\varphi) \tag{2.23}$$

$$\eta = \frac{4369.2453}{1 + (0.0433\dot{\gamma})^{0.75}} \cdot \left\{ 1 + \varphi \frac{247.3268}{\left[\ln\frac{1}{\varphi} + \ln\left(\ln\frac{1}{\varphi}\right) + 0.1585\right]} \right\} \tag{2.24}$$

donde (2.23) y (2.24) corresponden a la viscosidad del filamento de PLA fundido con suspensiones de partículas de diamante y nanotubos de carbono, respectivamente, en términos de su fracción volumétrica y la velocidad de corte.

Análogamente al procedimiento de cálculo de la velocidad de impresión óptima que produjo los resultados plasmados en la tabla 2.4, se establecieron los mismos parámetros para las partículas de diamante y para los NTC de acuerdo a la teoría de suspensiones, con la condición que en esta sección sólo se presentan para una fracción volumétrica de 0.02, pues es cuando existe una mayor viscosidad en ambos casos presentando también un incremento en la presión dentro del bloque de fundición. En las tablas 2.6 y 2.7 se resumen estos valores.

$\boldsymbol{\varphi}$	$\boldsymbol{v_3}$ $(\boldsymbol{m/s})$	$\boldsymbol{Q}$ $(\boldsymbol{m^3/s})$	$\boldsymbol{\dot{\gamma}}$ $(\boldsymbol{s^{-1}})$	$\boldsymbol{\eta_c}$ $(\boldsymbol{kPa \cdot s})$	$\boldsymbol{\Delta P}$ $(\boldsymbol{kPa})$
0.02	0	0	0	4.58770757	0
	0.01	3.14×10^{-8}	14.5773	2.6857818	123.159256
	0.02	6.28×10^{-8}	29.1545	2.09393058	192.038634
	0.03	9.42×10^{-8}	43.7318	1.7549023	241.418491
	0.04	1.26×10^{-7}	58.3090	1.52773893	280.224091
	0.05	1.57×10^{-7}	72.8863	1.36221511	312.328797

Tabla 2.6. Comportamiento reológico del compuesto con diamante según la velocidad de extrusión.

Lo que demuestra una velocidad de extrusión de aproximadamente $0.045\ m/s$.

En el caso de nanotubos de carbono se presenta que:

φ	$v_3\ (m/s)$	$Q\ (m^3/s)$	$\dot{\gamma}\ (s^{-1})$	$\eta_c\ (kPa \cdot s)$	$\Delta P\ (kPa)$
0.02	0	0	0	8.34613237	0
	0.01	3.14×10^{-8}	14.5773	4.88607656	224.056011
	0.02	6.28×10^{-8}	29.1545	3.80935828	349.363998
	0.03	9.42×10^{-8}	43.7318	3.19258512	439.197715
	0.04	1.26×10^{-7}	58.3090	2.77932086	509.794341
	0.05	1.57×10^{-7}	72.8863	2.47819362	568.200445

Tabla 2.7. Comportamiento reológico del compuesto con NTC según la velocidad de extrusión.

En donde la velocidad de extrusión límite se reduce drásticamente a un aproximado de $0.015\ m/s$.

Estos valores son de vital importancia no sólo para determinar la velocidad de alimentación de filamento sino también para el diseño de las condiciones dentro del elemento de fundición que contribuyan al mezclado de las dos fases. De esta manera las velocidades de extrusión límite antes mencionadas son las velocidades a lo largo de la zona 3 en la ilustración 2.6, de modo que:

$$v_{3,máx} = 0.045\ \frac{m}{s} \qquad v_{3,máx} = 0.015\ \frac{m}{s} \tag{2.25}$$

(Partículas de diamante) (Nanotubos de carbono)

con estos valores se pueden calcular los números de Reynolds correspondientes que en la siguiente sección habrán de ocuparse:

$$Re = \frac{2\rho v R}{\eta} \tag{2.26}$$

Siendo $\eta_c = 3.8698\ kPa \cdot s$ para partículas de diamante y $\eta_c = 4.0556\ kPa \cdot s$ para NTC. En cuanto a ρ se refiere a la densidad del fluido y $R = R_3$:

$$Re_{Diamantes} = 2.04 \times 10^{-5} \qquad Re_{NTC} = 6.47 \times 10^{-6} \tag{2.27}$$

2.4.1 ANÁLISIS DE INTERACCIONES INTERMOLECULARES

En la ecuación (1.28) se habló de una distancia promedio $\bar{h}$ entre las partículas en términos de su tamaño d_p y de su fracción volumétrica φ, con el fin de determinar su valor para el cual las fuerzas electroestáticas podrían ser o no ser despreciables. Si se considera que $\varphi = 0.02$ para ambos materiales (diamante y nanotubos de carbono) teniendo en cuenta una fracción volumétrica máxima para suspensiones diluidas, la expresión (1.28) resultaría en:

$$\frac{\bar{h}}{d_p} = \left(\frac{1}{0.06\pi} + \frac{5}{6}\right)^{\frac{1}{2}} - 1 \tag{2.28}$$

$$\bar{h} = 1.4776 d_p \tag{2.29}$$

El diámetro de la partícula d_p en la ecuación (2.29) se refiere al diámetro de una esfera. Puesto que en la deducción hecha por Woodcock [35] se consideran interacciones hidrodinámicas basadas en la ley de Stokes, es posible considerar un diámetro equivalente d_e como una aproximación al diámetro de la esfera en dicha relación, es decir, el diámetro de una esfera que posee el mismo volumen que la partícula original:

$$d_e = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.30}$$

donde V corresponde al volumen de la partícula en cuestión, que para un nanotubo de carbono resulta en $V = 100530.9649\ nm^3$. De manera que el diámetro equivalente para un nanotubo de carbono es:

$$d_{e\ (NTC)} = 36.3424\ nm \tag{2.31}$$

De forma general la ecuación (2.28) se puede reescribir considerando la forma de las partículas como esferas y cilindros en la ecuación (2.32):

$$\bar{h} = 1.4776 d_p \qquad \bar{h} = 1.4776\left(\frac{3d_C^2 L_C}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.32}$$

(Partículas con forma esférica) (Partículas con forma cilindrica)

donde d_c y L_c corresponden al diámetro y la longitud del cilindro, respectivamente. Una vez dadas las propiedades geométricas de las partículas utilizadas en este proyecto (tabla 2.4) se tiene que la distancia promedio $\bar{h}$ para la cual las fuerzas electroestáticas entre las partículas son despreciables:

$$\bar{h}_{Diamante} = 8865.6\ nm \qquad \bar{h}_{NTC} = 53.6995\ nm \tag{2.33}$$

2.4.1.1 Adhesión de las partículas al filamento de PLA sólido

Las partículas refuerzo utilizadas en este proyecto se implementaron en el sistema de extrusión durante el transporte del filamento de PLA cuando éste aún se encuentra en un estado sólido.

Para calcular la fuerza de adhesión se calcula inicialmente la energía de superficie por unidad de área para un cilindro (en el caso de un nanotubo de carbono) y para una esfera (en el caso de una partícula de diamante sintético), ambos en contacto con una superficie plana y suponiendo que no existe deformación debido al contacto (de lo contrario sería necesario utilizar otras teorías que describan el comportamiento, las cuales están fuera del alcance del nivel de este trabajo):

$$W_{NTC-PLA} = -\frac{A_H\sqrt{r_p}}{12\sqrt{2}h^{*3/2}}\ , \quad h^* = 2r_p \tag{2.34}$$

$$W_{Diamante-PLA} = -\frac{A_H r_p}{6h^*}\ , \quad h^* = 2r_p \tag{2.35}$$

Las constantes de Hamaker para los materiales se enlistan en la tabla 2.8.

MATERIAL	A_H
PLA	$3.84 \times 10^{-20}\ J$
Nanotubos de carbono	$2.842 \times 10^{-20}\ J$
Diamante sintético	$29.6 \times 10^{-20}\ J$

Tabla 2.8. Constantes de Hamaker *en vacío* de los materiales utilizados en este proyecto.

Para conocer la constante de Hamaker de dos materiales (1 y 2) en un medio (3) puede realizarse una combinación de estos por medio de la ecuación

$$A_{H,132} \approx \sqrt{A_{H,131}A_{H,232}} \tag{2.36}$$

Con la aproximación de la ecuación (2.36) se puede determinar que la constante de Hamaker para NTC y PLA a través del vacío es:

$$A_{H,CNT-PLA} = 3.3035 \times 10^{-20}\ J \tag{2.37}$$

mientras que para el diamante sintético con el PLA corresponde a:

$$A_{H,Diamante-PLA} = 10.6613 \times 10^{-20}\ J \tag{2.38}$$

La fuerza total de adhesión entre los elementos es la suma de varias fuerzas, incluidas la fuerza capilar F_C, las interacciones de van der Waals F_{vdW}, fuerzas electrostáticas F_E y fuerzas de enlace químico F_B [51].

$$F_{adh} = F_{vdW} + F_C + F_E + F_B \tag{2.39}$$

Sin embargo en este trabajo se asume que F_E y F_B son iguales a cero, a la vez que F_C se considera despreciable con el fin de simplificar el análisis, de manera que:

$$F_{adh} = F_{vdW} \tag{2.40}$$

Para el caso de los nanotubos de carbono la fuerza de adhesión es de $F_{adh} = 0.0289\ N$; y para las partículas de diamante sintético se tiene que $F_{adh} = 2.7764 \times 10^{-7}\ N$. Lo anterior se obtuvo con una distancia intermolecular de $\approx 2\text{Å}$.

Para determinar si las partículas se mantendrán en su sitio debido a la fuerza de adhesión se realizó un análisis estático según el diagrama de cuerpo libre mostrado en la ilustración 2.12 donde μ corresponde al coeficiente de fricción estático del PLA que según Běhálek *et al.* [52] es de 0.16.

El peso W de una partícula de diamante sintético en promedio es de $2.2527 \times 10^{-12}\ N$ mientras que para el de un nanotubo de carbono es aproximadamente de $3.4503 \times 10^{-19}\ N$.

Haciendo un balance de fuerzas en sentido horizontal y vertical según las ecuaciones se tiene que:

$$\sum F_H = 0 \qquad F_{adh} = N \tag{2.41}$$

$$\sum F_V = 0 \qquad W = \mu N \tag{2.42}$$

La fuerza mínima de adhesión para una partícula de diamante sintético y para un nanotubo de carbono resulta en $1.4079 \times 10^{-11}\ N$ y $2.1564 \times 10^{-18}\ N$, respectivamente, por lo que la aplicación manual de las partículas de refuerzo directamente al filamento de PLA sólido es viable para fines prácticos de acuerdo a los objetivos de este proyecto.

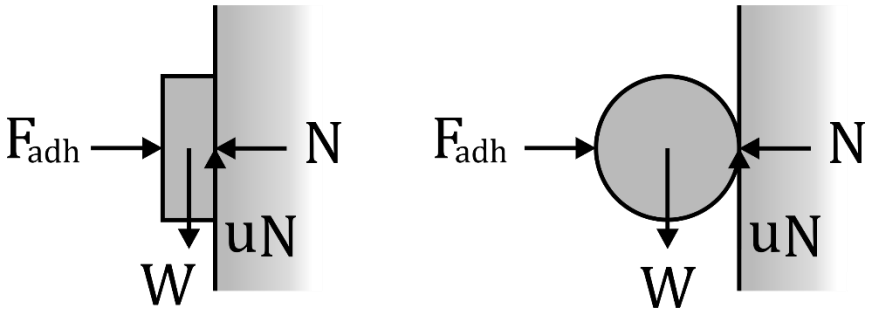


Ilustración 2.12. DCL de las fuerzas que actúan en el fenómeno de adhesión de un nanotubo de carbono y una partícula de diamante sintético, respectivamente.

2.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DENTRO DEL CONDUCTO

De acuerdo a la sección 1.1.5.2, algunas partículas de la fase dispersa podrán tener una tendencia a migrar hacia las paredes del conducto. Con la ecuación (1.30) se puede calcular la distancia de equilibrio en donde una parte de las partículas se posicionarán. A pesar que la ecuación establece un límite de $1 < Re < 36$, es aplicable para números de Reynolds menores a la unidad, sin embargo se considera que las partículas tendrán un desplazamiento prolongado a lo largo del eje longitudinal antes de llegar a su posición de equilibrio r_{eq}.

Para partículas de diamante con radios de partícula $r_p = 4 \text{ a } 6\ \mu m$ el radio de equilibrio resultaría de:

$$\frac{r_{eq,d}}{R_3} = \left(1 - \frac{r_p}{R_3}\right)\frac{1}{\sqrt{2}} \tag{2.43}$$

$r_p\ (\mu m)$	$r_{eq}\ (mm)$
4	0.49214632
4.5	0.491792766
5	0.491439213
5.5	0.49108566
6	0.490732106

Tabla 2.9. Posición de equilibrio para partículas de diamante.

La tabla 2.9 demuestra que a medida que el tamaño de las partículas incrementa, estas tienden a ir hacia el centro del conducto. La distancia de equilibrio para las partículas de diamante representa aproximadamente un 50% del radio del conducto

En el caso de los nanotubos de carbono, para los cuales se calculó un diámetro equivalente según la ecuación (2.31).

$d_e\ (nm)$	r_{eq}
36.3424	0.494961898

Tabla 2.10. Posición de equilibrio para NTC.

Al igual que con las partículas de diamante, la distancia de equilibrio para los nanotubos de carbono se ubica cerca de un 50% de la línea central del conducto con relación al radio de este.

2.4.3 DISEÑO DE LA ZONA DE MEZCLADO

En esta sección se incluye el diseño de la zona de mezclado tomando en cuenta algunos criterios de la mecánica de fluidos como la separación del fluido a través de una capa límite y la formación de vórtices.

Una superficie de discontinuidad se caracteriza por inducir una diferencia en las velocidades de un fluido que la atraviesa. Esta condición da origen a la formación de torbellinos, entre otros fenómenos, cuando una corriente fluida pasa por un borde.

En la ilustración 2.13 se explican los fundamentos que sentaron las bases para el diseño de la zona de mezclado. Inicialmente el flujo tiene una velocidad en el vértice muy alta, que el caso de un fluido ideal sin viscosidad teóricamente se haría infinita. Sin embargo si se observa este fenómeno en un fluido real, la velocidad en el vértice disminuye como consecuencia de la formación de un vórtice que se desprende y es arrastrado por el flujo principal.

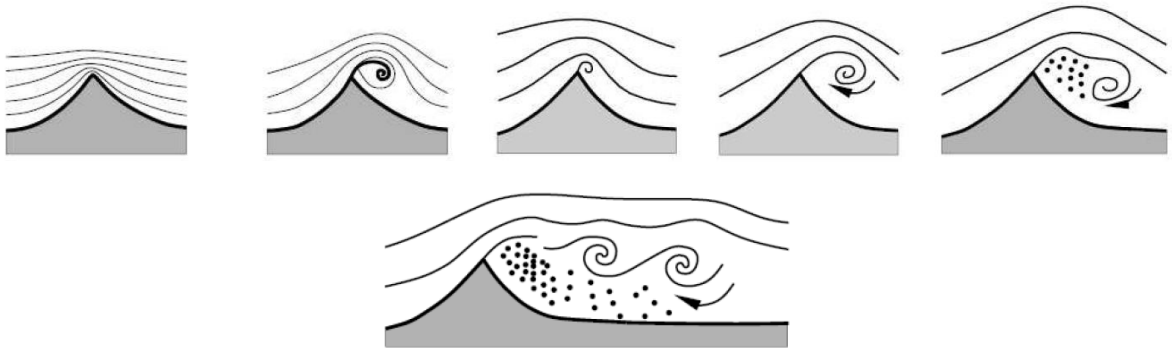


Ilustración 2.13. Formación de un vórtice en un borde agudo.

En el flujo laminar, la rugosidad de la tubería tiene muy poca influencia en la pérdida de carga porque las líneas de corriente en la zona de la capa límite poseen velocidades de flujo muy reducidas o en algunos casos no se mueven. En cambio en el flujo turbulento resulta decisivo si el espesor δ de la capa límite se extiende por encima de las irregularidades de la superficie del conducto y las cubre completamente. En este caso se habla de tuberías lisas hidráulicamente y las irregularidades no influyen en la pérdida de carga. Sin embargo, cuando estas se extienden muy por encima de la capa límite, el efecto de alisado se pierde y numerosos vórtices se generan disminuyendo el espesor δ. Estos vórtices son necesarios para proporcionar que las partículas se mezclen a causa del movimiento del fluido.

Además dentro de la capa límite, existe el espesor de desplazamiento $\delta^*(x)$, el cual se puede definir como el aumento imaginario en espesor de la pared del conducto, visto por el flujo, debido al efecto de la creciente capa límite. Este fenómeno junto con la capa límite $\delta(x)$ se presentan en la ilustración

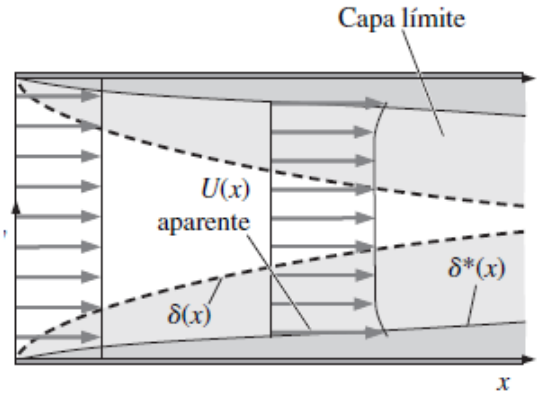


Ilustración 2.14. Capa límite y espesor de deslizamiento

De acuerdo a estos conceptos se recurrió a realizar una serie de muescas a lo largo del conducto en la zona 3 para inducir turbulencia en el fluido propiciando así el óptimo mezclado de las partículas con la fase continua. La profundidad de las muescas se determinó de acuerdo al espesor de desplazamiento $\delta^*(x)$ según la ecuación (2.44)

$$\frac{\delta^*}{x} = \frac{1.72}{\sqrt{Re_x}} \tag{2.44}$$

donde $x = L_3$ y $Re_x = \frac{v_3 \cdot L_3 \cdot \rho}{\eta_c}$.

Se considera a la viscosidad del compuesto con una fracción volumétrica máxima de $\varphi = 0.02$ pues es en esa condición cuando se tienen las velocidades más pequeñas en el conducto y por ende el mayor espesor de desplazamiento. Sin embargo al aplicar la ecuación (2.44) se obtiene un valor muy elevado en el espesor que incluso queda fuera del tamaño del conducto. El número de Reynolds calculado puede ser el responsable ya que constituye una cantidad muy pequeña lo que eleva en gran medida al espesor de desplazamiento.

Sin embargo Çengel [53], establece que el espesor de la capa límite se ubica hasta en un 99% de la velocidad del flujo, es decir que $u = 0.99v_3$, por lo que $u = 0.04455\, m/s$. Así de acuerdo a la ecuación (2.8) se tiene que:

$$u = 2v_3\left[1 - \left(\frac{r}{R_3}\right)^2\right] \tag{2.45}$$

donde r significa la distancia desde el centro del conducto hacia donde comienza la capa límite, de manera que:

$$r = 0.4974\ mm \tag{2.46}$$

entonces, el espesor de la capa límite se ubica en $R_3 - r$:

$$\delta = 0.2026\ mm \tag{2.47}$$

mientras que el espesor de desplazamiento es aproximadamente un tercio del espesor de la capa límite [53], por lo que:

$$\delta^* \approx 0.0675\ mm \tag{2.48}$$

Así el espesor de la capa límite corresponde a un $28.94\ \%$ del radio del conducto mientras que el espesor de desplazamiento ocupa el 9.64% del mismo, aproximadamente.

El tamaño de las muescas que se deben realizar para inducir vórtices disminuyendo la capa límite debe ser igual o mayor a $0.2026\ mm$. Dichas muescas se realizaron mediante roscado con el objetivo de obtener un tamaño uniforme de las mismas.

Los perfiles de rosca métricos y estándar se muestran en la ilustración 2.15.

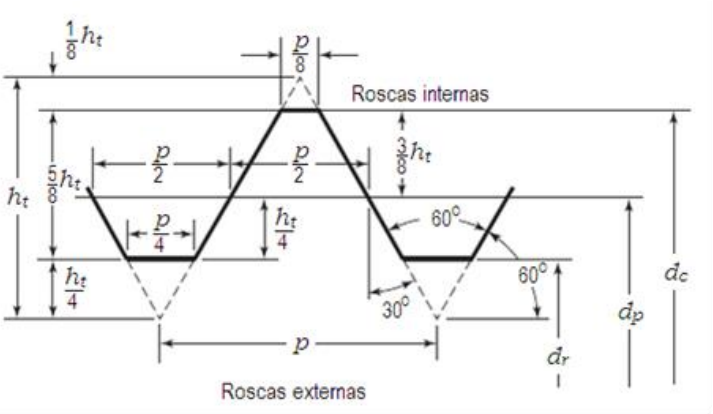


Ilustración 2.15. Detalles de los perfiles de rosca M y UN.

La longitud expresada como $\frac{5}{8}h_t$ se ha denominado como la altura de rosca efectiva h_{ef} (donde $h_t = 0.866p$) y se considera como la altura necesaria de la rosca para inhibir los efectos de la capa límite y así inducir pequeños vórtices que propicien el mezclado de los componentes. Sin embargo el tamaño del conducto limita la aplicación de ciertos tipos de rosca puestos están en función del diámetro del orificio. En la tabla 2.11 se enlistan algunos tipos de rosca aplicables de acuerdo al tamaño del orificio ya establecido.

ROSCA MÉTRICA				
Denominación		Paso (mm)	h_{ef} (mm)	Tamaño de broca (mm)
$M1.6 \times 0.35$		0.35	0.1894	1.3
$M1.6 \times 0.35$		0.35	0.1894	1.3208
$M1.8 \times 0.35$		0.35	0.1894	1.45
$M1.8 \times 0.35$		0.35	0.1894	1.5
$M1.8 \times 0.35$		0.35	0.1894	1.5113
ROSCA ESTÁNDAR				
Denominación	Hilos por pulgada	Paso $(pulg)$	h_{ef} (mm)	Tamaño de broca (mm)
$\#1 - 64$	64	0.015625	0.2148	1.397
$\#1 - 64$	64	0.015625	0.2148	1.5113
$\#1 - 72$	72	0.01388889	0.1909	1.5113

Tabla 2.11. Tipos de rosca compatibles (aproximadamente) con el diámetro del conducto.

Por lo tanto el tipo de rosca con denominación $\#1 - 64$ y diámetro de orificio ≈ 1.4 cumple con las especificaciones necesarias para el objetivo de esta sección.

$$h_e > \delta \tag{2.49}$$

Con la aplicación de la rosca se espera la generación de vórtices en el fluido. Éste análisis se realizó con un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), el cual es descrito en la siguiente sección.

2.5 SIMULACIÓN DEL FLUIDO A TRAVÉS DEL CONDUCTO

El estudio de simulación se realizó con el software ANSYS versión 17.0, mientras que la geometría (Apéndice C) fue realizada en SolidWorks

El mallado es el medio discretizado en el espacio, en el que la geometría de la pieza se separa en múltiples elementos los cuales, mediante aproximaciones, se analizan individualmente hasta converger en una solución particular.

Para el análisis se utilizó una malla automáticamente determinada por el software con una relevancia de 100. Se utilizaron un total de $368{,}145$ elementos tetraédricos y $70{,}753$ nodos. Algunas otras mediciones estadísticas de la malla fueron obtenidas.

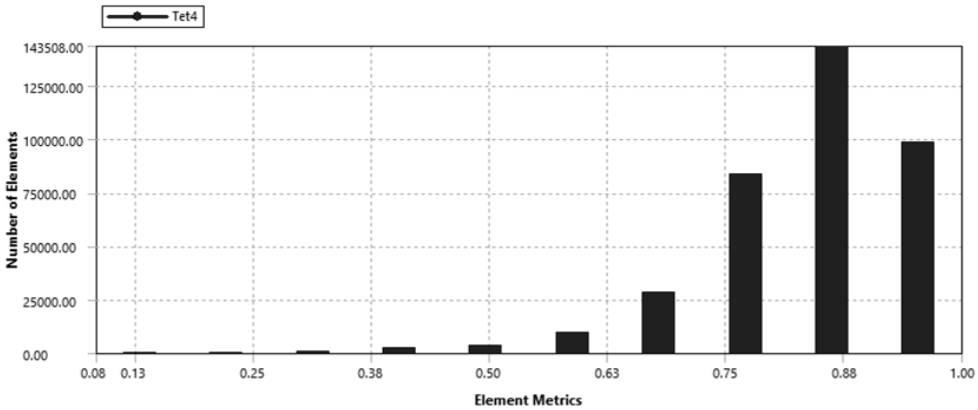


Ilustración 2.16. Calidad del elemento.

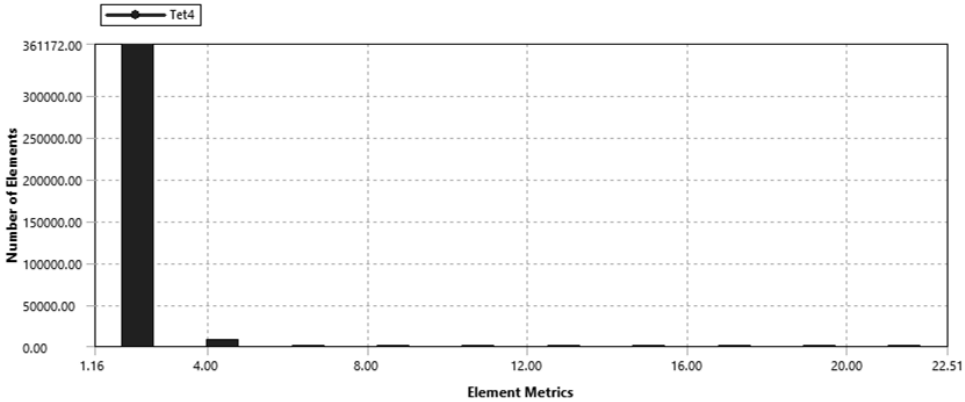


Ilustración 2.17. Relación de aspecto de los elementos del mallado.

La relación de aspecto considera el cociente entre las dimensiones de los elementos. En este caso el elemento de referencia es un tetraedro con triángulos equiláteros por caras, por lo tanto su relación de aspecto es igual a 1.

El parámetro *skewness* define la asimetría u oblicuidad del elemento, es decir, determina qué tan cerca se encuentra un elemento de una cara ideal. Contrario a la relación de aspecto, los elementos con valores cercanos a 0 presentan mayor semejanza al elemento ideal.

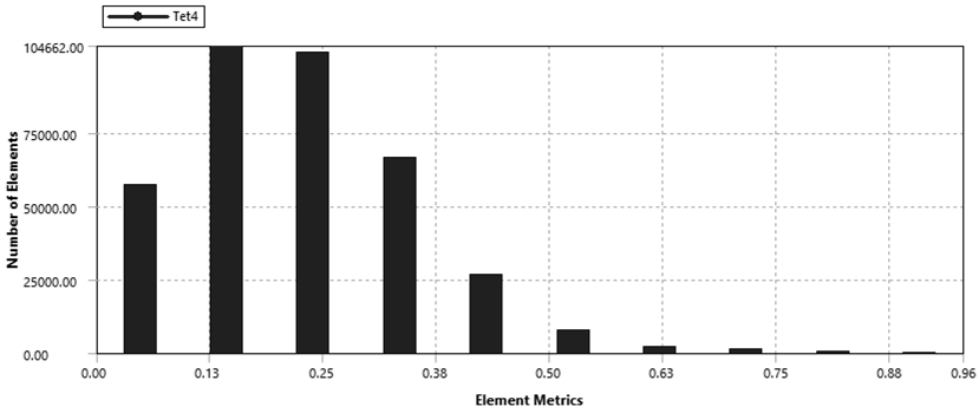


Ilustración 2.18. *Skewness* en los elementos del mallado.

Finalmente la ortogonalidad describe el desfase entre vectores normales de la cara de los elementos, vectores normales del centroide de la celda al centroide de la cara y vectores normales del centroide de la celda al centroide de la celda adyacente. Se dice que la calidad ortogonal es buena cuando el valor del desfase es cercano a 1, mientras que sucede lo contrario cuando dicho valor se aproxima a 0.

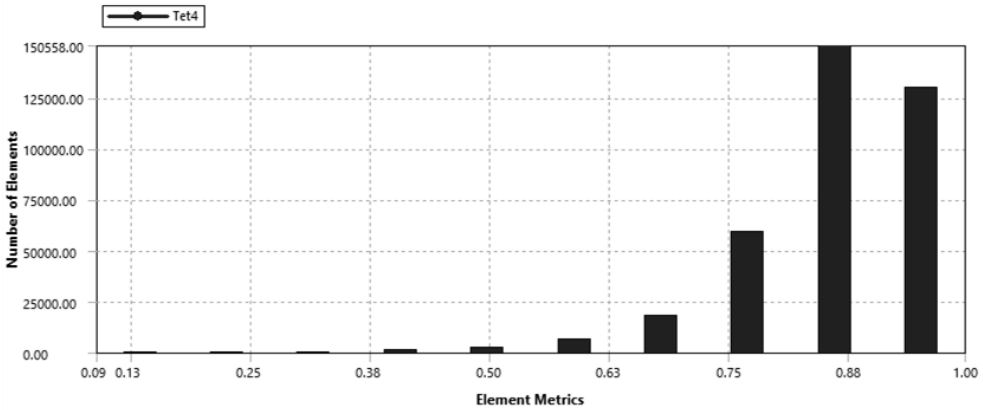


Ilustración 2.19. Ortogonalidad de los elementos del mallado.

CAPÍTULO TRES ▪ RESULTADOS

3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN LOS DISIPADORES DE CALOR.

La elección del disipador de calor del modelo E3D-v5 se explicó en la sección 2.1, sin embargo el gradiente de temperaturas es explicado en esta sección.

En la ilustración 3.1 se aprecia la distribución de temperaturas del disipador de calor modelo *Hexagon*, en donde se puede apreciar temperaturas demasiado altas incluso en la zona de acoplamiento con el cabezal de la impresora. Sorprendentemente el bloque de fundición se muestra con una temperatura menor a la del cartucho calefactor, esto puede deberse a la holgura que existe entre estos dos elementos lo que propicia la existencia de una pequeña sección de aire entre los elementos impidiendo así un flujo de calor óptimo hacia el bloque.

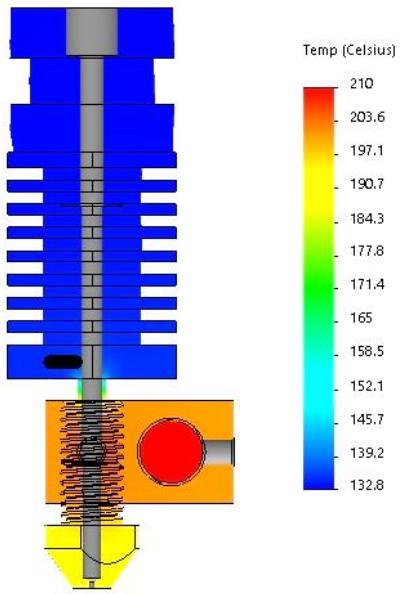


Ilustración 3.1. Gradiente de temperaturas modelo *Hexagon*.

En cambio, en la ilustración 3.2 es posible apreciar una distribución de temperaturas más uniforme en el bloque de extrusión del modelo *E3D-v5*, y aunque el tamaño del extrusor en general es mayor al modelo *Hexagon*, se obtienen temperaturas más bajas que en el antes mencionado.

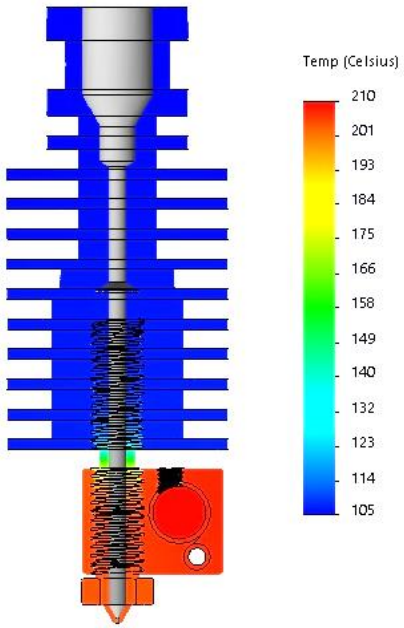


Ilustración 3.2. Gradiente de temperaturas modelo *E3D-v5*.

Como se explicó en el capítulo anterior, el análisis térmico permitió obtener los coeficientes de trasferencia de calor por convección promedio de cada disipador de calor, los cuales se presentan en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

Para el modelo *Hexagon* se tiene que:

$$h_{conv} = 25.952\ W/m^2 \cdot K \tag{3.1}$$

mientras que para el modelo *E3D-v5* corresponde a:

$$h_{conv} = 31.845\ W/m^2 \cdot K \tag{3.2}$$

3.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL COMPUESTO

A continuación se describen las propiedades del material compuesto de acuerdo a la fracción volumétrica de cada uno de los componentes, considerando a $\varphi = 0.02$ como la fracción en volumen máxima de la segunda fase.

3.2.1. DENSIDAD

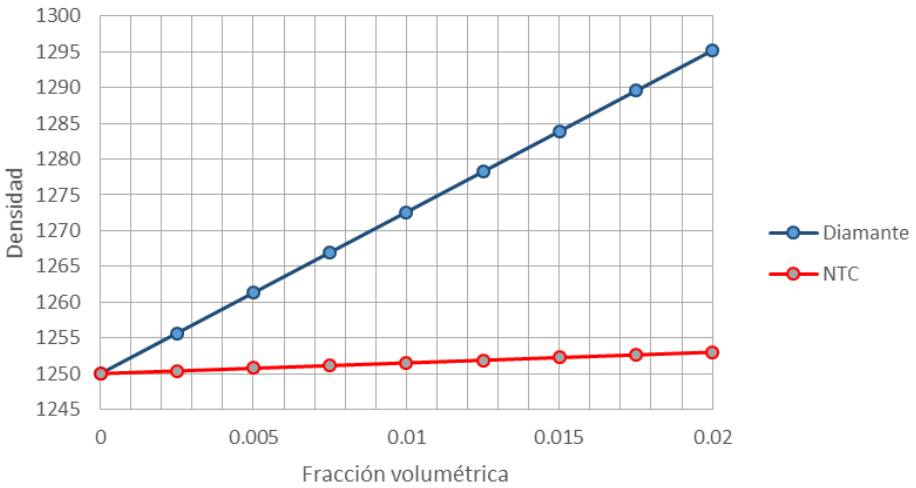


Ilustración 3.3. Densidad del compuesto de acuerdo a la regla de mezclas.

3.2.2. VISCOSIDAD DINÁMICA DEL COMPUESTO CON DIAMANTE A $205\ °C$

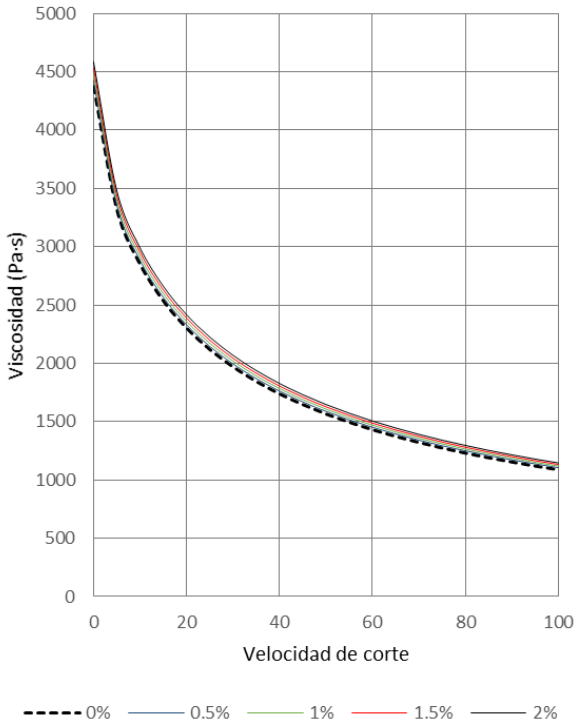


Ilustración 3.4. Viscosidad del PLA y del compuesto para distintas concentraciones de diamante.

3.2.3. ESFUERZO CORTANTE EN LA PARED DEL CONDUCTO (DIAMANTE-FLUIDO)

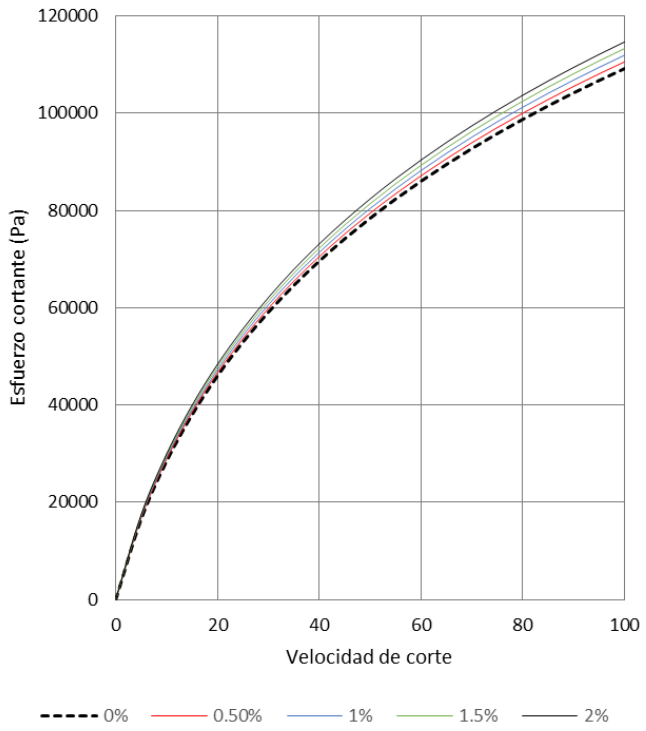


Ilustración 3.5. Variación del esfuerzo cortante en el conducto por partículas de diamante.

3.2.4. VISCOSIDAD DINÁMICA DEL COMPUESTO CON NTC

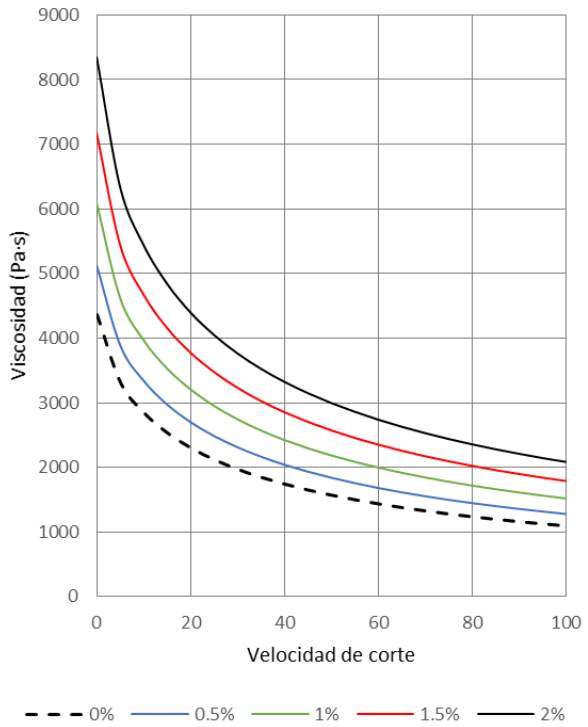


Ilustración 3.6. Viscosidad del PLA y del compuesto para distintas concentraciones de NTC.

3.2.5. ESFUERZO CORTANTE EN LA PARED DEL CONDUCTO (NTC-FLUIDO)

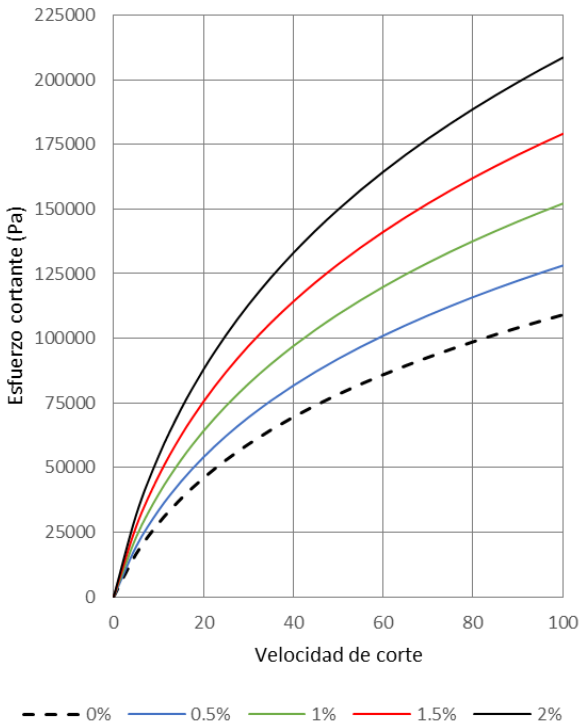


Ilustración 3.7. Variación del esfuerzo cortante en el conducto por nanotubos de carbono.

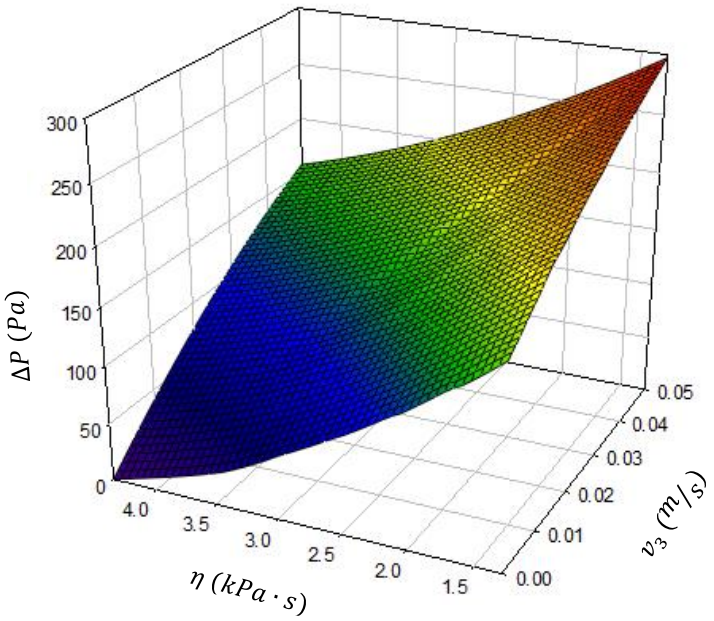


Ilustración 3.8. Relación entre la presión interna, la viscosidad y la velocidad de extrusión del PLA.

En la ilustración 3.8 se relaciona la presión dentro del conducto antes de llegar a su presión máxima, la viscosidad y la velocidad de extrusión v_3. Esto sin tomar en consideración a la segunda fase.

3.3 DISEÑO FINAL DEL ELEMENTO DE FUNDICIÓN

De acuerdo al procedimiento de la sección 2.4.3, el elemento de fundición se muestra en la ilustración 3.9. Los dibujos técnicos se encuentran en el apéndice C.

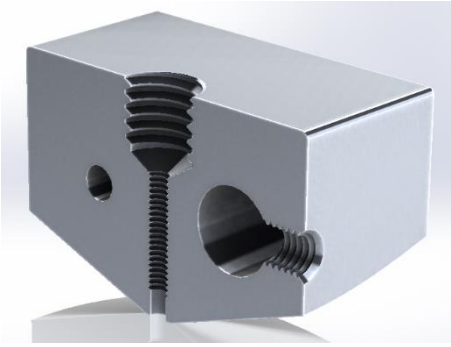


Ilustración 3.9. Corte transversal del bloque de fundición.

Las perforaciones realizadas para el cartucho calefactor y el termistor coinciden con las del bloque del modelo *E3D-v5* con el fin de compartir los mismos componentes de este.

Ilustración 3.10. Vista del bloque de fundición.

La boquilla fue incluida en el bloque de extrusión pues así se evitaba incrementar en tamaño del extrusor. El diámetro de la boquilla está dentro del rango utilizado en las impresiones 3D.

Ilustración 3.11. Ensamble del elemento de fundición, garganta y disipador de calor.

3.4 SIMULACIÓN DEL FLUIDO

Para la simulación del fluido únicamente se considera a la viscosidad del material compuesto, pues las partículas al ser de tamaños coloidales siguen las líneas de flujo.

3.4.1 PLA CON PARTÍCULAS DE DIAMANTE

Los resultados de las líneas de corriente para el PLA con partículas de diamante se muestran a continuación.

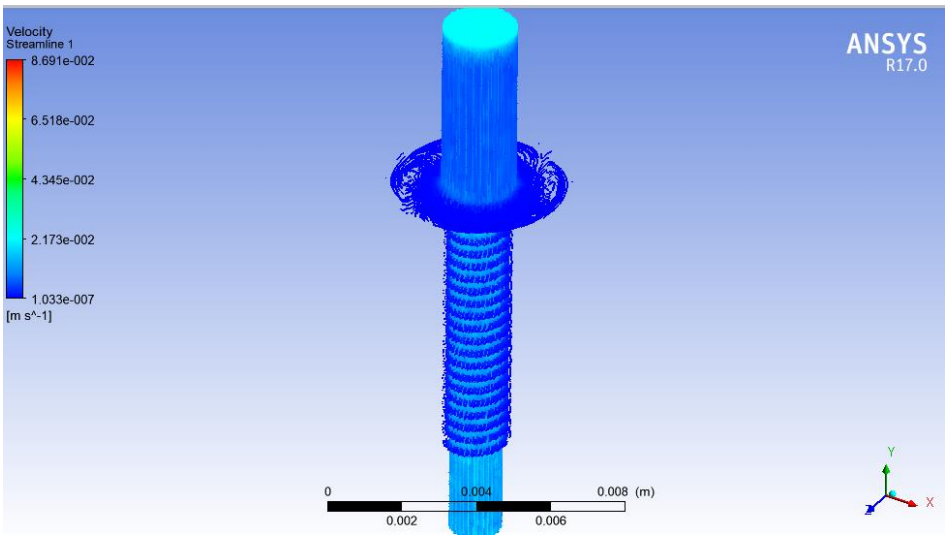


Ilustración 3.12. Líneas de corriente en el conducto (PLA-Diamante).

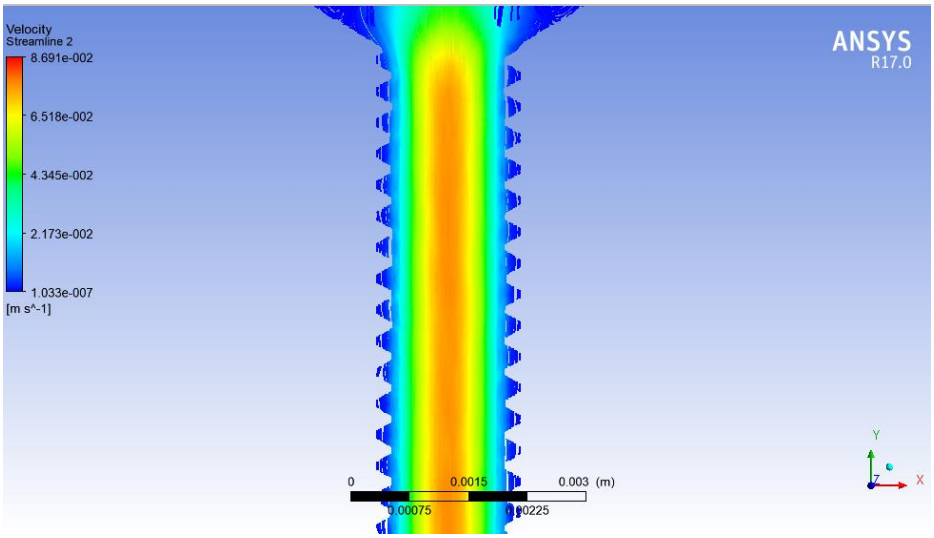


Ilustración 3.13. Distribución de velocidades del PLA-Diamante en la zona de mezclado.

En la zona de mezclado se puede apreciar un aumento de velocidad en las líneas de flujo producto de los vórtices provocados por las muescas alrededor del conducto.

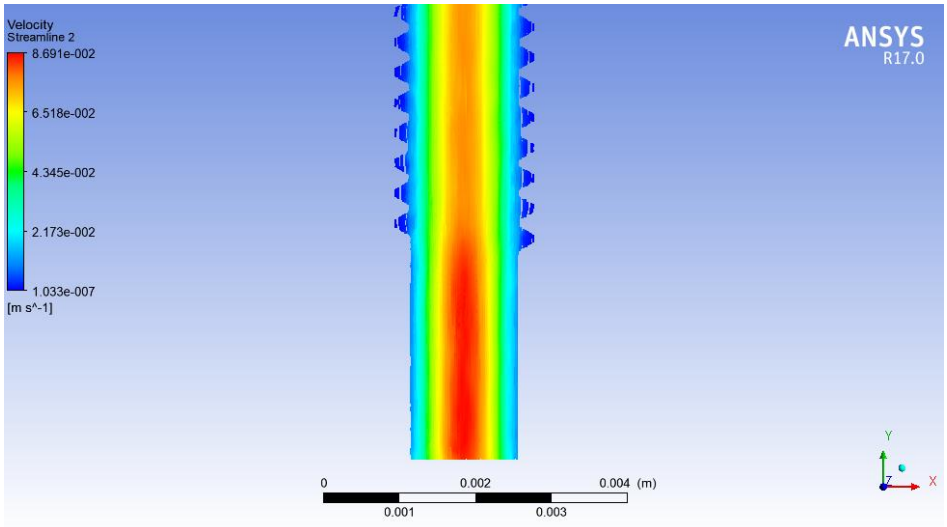


Ilustración 3.14. Gradiente de velocidades en la zona de extrusión (PLA-Diamante).

Por último en la zona de extrusión (ilustración 3.14) se observa otro incremento en la velocidad del flujo, a causa del incremento de la capa límite en las paredes del conducto y de la reducción del diámetro de este.

3.4.2 PLA CON NANOTUBOS DE CARBONO

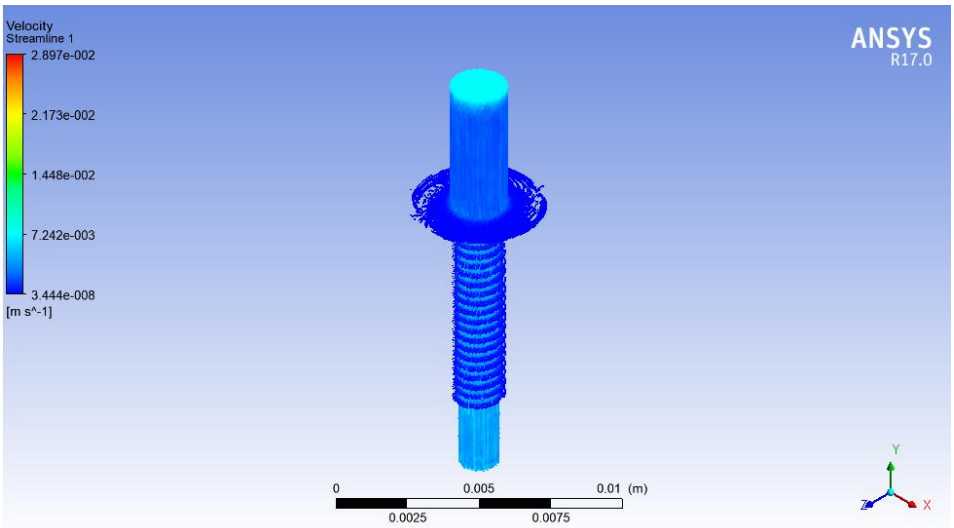


Ilustración 3.15. Líneas de corriente en el conducto (PLA-NTC).

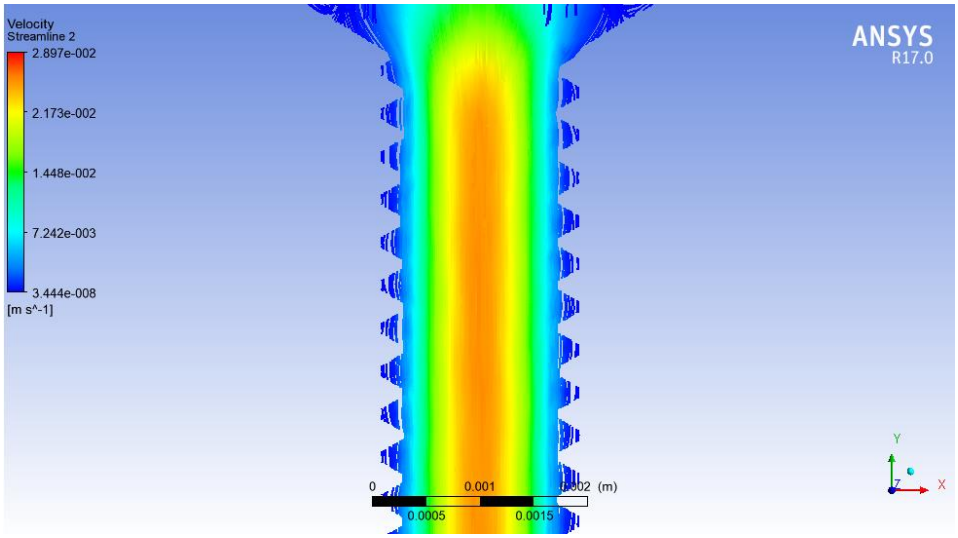


Ilustración 3.16. Distribución de velocidades del PLA-NTC en la zona de mezclado.

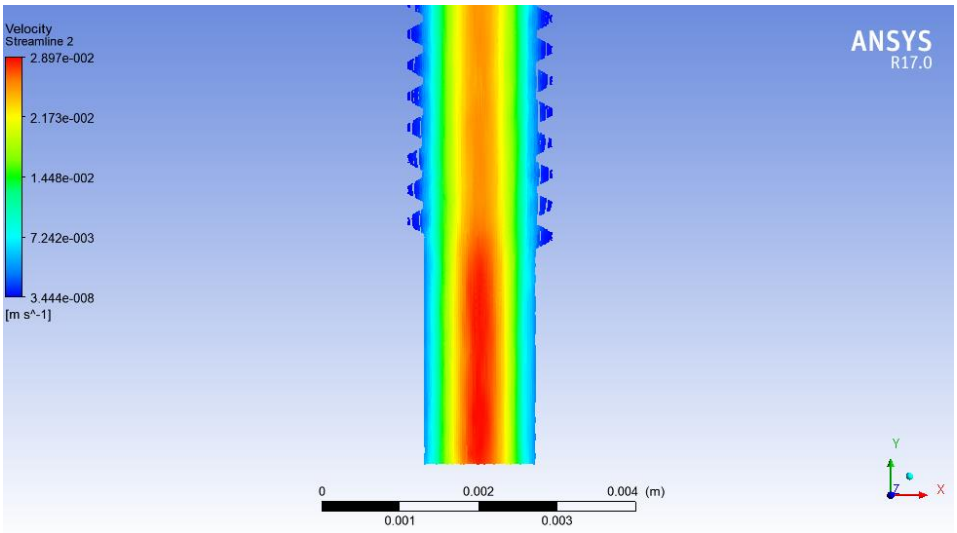


Ilustración 3.17. Gradiente de velocidades en la zona de extrusión (PLA-NTC).

El comportamiento del fluido con NTC tiene algunas variaciones respecto a cuándo posee partículas de diamantes, principalmente en el gradiente de velocidades máximas de extrusión.

3.5 VALIDACIÓN EN MICROSCOPIO

Una vez extruidos los segmentos de filamento con partículas de diamante y nanotubos de carbono respectivamente, se hizo un análisis empírico a través de un microscopio para observar a grandes rasgos la calidad del mezclado de los componentes. Las ilustraciones fueron tomadas directamente del microscopio.

Ilustración 3.18. Filamento de PLA virgen para impresión 3D.

A pesar que el filamento contaba con una alta concentración de humedad, lo que provocó errores superficiales en los segmentos extruidos, el procedimiento resulta prometedor de acuerdo a las ilustraciones

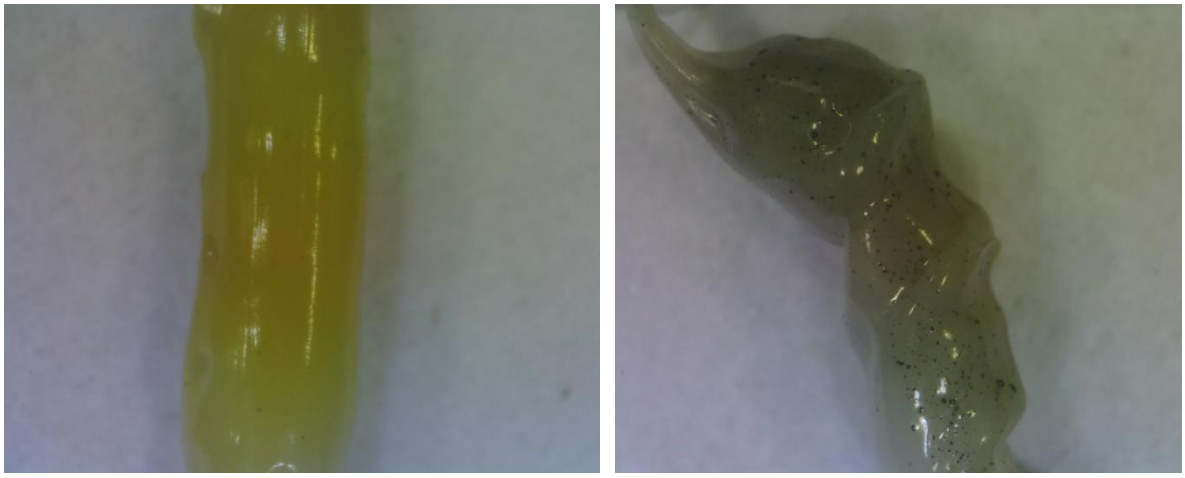


Ilustración 3.19. Filamento de PLA extruído con diamante sintético (izquierda) y NTC (derecha).

3.6 AJUSTES DEL CONTROL PID DE LA IMPRESORA 3D

El control PID es el algoritmo de control que las impresoras usan para mantener la temperatura. Los parámetros de este algoritmo controlan qué tan rápido la impresora alcanza la temperatura establecida y qué tan bien mantiene esa temperatura una vez que llega allí. La impresora Robo 3D R1 tiene una forma automática de ajustar estos valores:

Desde la terminal de códigos G que se ubica en el software MatterControl se escribió el comando $M303\ E0\ S205\ C3$ para iniciar el *PID tuning*, considerando que $E0$ es el comando para impresoras de solamente un extrusor, S es la temperatura en la que se quiere realizar el *tuning* y C el número de ciclos de afinación a correr para el cual la comunidad de expertos en impresiones 3D recomienda un mínimo de 3 ciclos.

Una vez que se introdujeron los códigos, la impresora inició el proceso de autoajuste realizando ciclos de temperatura hacia arriba y hacia abajo en el transcurso de algunos minutos hasta llegar a una solución.

Por último la impresora imprimió en pantalla los valores para k_p, k_i y k_d que corresponden a las constantes en el control PID. Los resultados se muestran en la ilustración

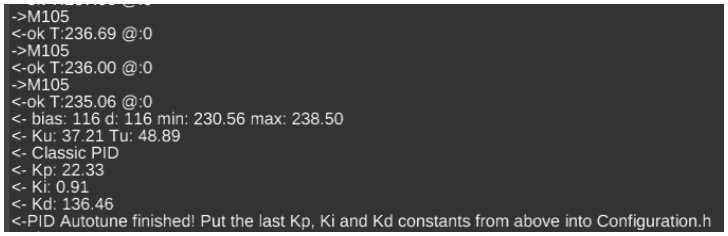


Ilustración 3.20. Captura de pantalla del proceso de *autotune*.

$$k_p = 22.33 \tag{3.3}$$

$$k_i = 0.91 \tag{3.4}$$

$$k_d = 136.46 \tag{3.5}$$

Para finalizar se escribió el comando $M500$ para guardar los cambios en la configuración.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se corroboró la funcionalidad para realizar impresión de filamento en impresoras 3D con materiales compuestos con diamante sintético y nanotubos de carbono como segunda fase, esto de acuerdo a la teoría de suspensiones diluidas. Se analizó que las concentraciones volumétricas de las segundas fases cercanas e iguales al 2% del compuesto, afectan en la viscosidad de este último y por lo tanto en su velocidad de impresión dependiendo del principalmente de la relación de aspecto que presenten las partículas. Para el caso de partículas con forma de diamante, el aumento de la fracción en volumen no contribuyó a variaciones considerables en la viscosidad del PLA, caso contrario para los nanotubos de carbono cuya concentración máxima analizada en este trabajo produjo un aumento de casi un 50% en la viscosidad del PLA.

El cálculo de la velocidad máxima de extrusión que puede soportar el filamento de PLA antes de presentarse fallas por pandeo establece las bases para el análisis de otros tipos de materiales utilizados como segunda fase en la matriz polimérica.

Se resolvió para una adecuación lo menos invasiva posible en las características de la impresora, priorizando un intercambio del elemento semejante a los ya conocidos por el usuario.

Uno de los objetivos primordiales en la creación de materiales compuestos se centra en mejorar las propiedades mecánicas de un material a través de la inclusión de una segunda fase. Para esto se requieren en ocasiones fracciones volumétricas más altas de las presentadas en este trabajo, por lo que un análisis de extrusión con teorías de suspensiones semidiluidas y concentradas ampliaría el uso de la técnica aquí desarrollada.

Actualmente la producción de filamentos con inclusiones de nanotubos de carbono no conlleva un ordenamiento de las partículas dentro de este por lo que implementar sistemas de alineamiento por ultrasonido o por flujo cortante serían buenas opciones para aprovechar en mayor medida las propiedades de estos materiales.

La alta calidad de resolución en las técnicas de deposición por hilo caliente y la capacidad de producir geometrías complejas con materiales compuestos prometen un gran avance en la producción de piezas a base de materiales compuestos con propiedades dirigidas capaces de integrarse a organismos vivos

Por último el análisis computacional de dinámica de fluidos podría ser una gran herramienta para simular el mezclado de los componentes de acuerdo a flujos bifásicos e incluso de requerirse, flujos multifásicos.

TRABAJOS CITADOS

[1] S. K. Mazumdar, Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, CRC Press, 2002.

[2] R. A. Domínguez, M. d. M. Espinosa, L. Romero y M. Domínguez, «Impresión 3D en ingeniería médica,» de *VI Encuentro de investigación - IMIENS*, 2016.

[3] «The ProForma 3D Printing Store,» [En línea]. Available: https://proforma-3dprinting-store.myshopify.com/collections/filaments/products/filaone-gray-advanced-composite-filament-samples. [Último acceso: Agosto 2017].

[4] «Robo 3D,» [En línea]. Available: http://www.community.robo3d.com. [Último acceso: Septiembre 2017].

[5] H. Sang-Ha, P. Young-Bin, Y. Kwan Han y B. Dae Suk, «Smart materials and structures based on carbon nanotube composites,» *INTECH,* p. 379, 2011.

[6] Y. Haik, J. Chatterjee y C. J. Chen, «Assisted alignment of carbon nanotubes,» *Nanotech,* vol. 3, pp. 300 - 301, 2004.

[7] «RepRap,» [En línea]. Available: http://reprap.org/wiki/RepRap. [Último acceso: Septiembre 2017].

[8] A. Bellini, «Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design,» *Tesis de doctorado,* 2002.

[9] V. N., R. S., M. M.J., S. A. y D. S.C., «Mechanical and rheological propierties of feedstock material for fused deposition of ceramics and metals (FDC and FDMet) and their relationship to process performance,» *Rutgers University,* p. 542, 1998.

[10] B. N. Turner, R. Strong y S. A. Gold, «A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling,» *Rapid Prototyping Journal,* vol. 20, nº 3, pp. 192-204, 2014.

[11] A. Bellini, S. Güçeri y M. Bertoldi, «Liquefier dynamics in fused deposition,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 126, pp. 237-246, 2004.

[12] R. B. Bird, R. C. Armstrong y O. Hassager, Dynamics of polymeric liquids, Segunda ed., vol. 1. Fluid mechanics, Jhon Wiley & Sons, Inc., 1987.

[13] C. Rauwendaal, Polymer extrusion, Quinta ed., Munich: Hanser Publishers, 2014.

[14] M. Roxas y S. Ju, «Fluid dynamics analysis of desktop-based fused deposition modeling rapid prototyping,» *Tesis de doctorado,* 2008.

[15] W. Michaeli, Extrusion dies for plastics and rubber: Design and engineering computation, Tercera ed., New York: Hanser Publishers, 1992.

[16] C. R.S. y C. P.D., «The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques,» 1997.

[17] L. Serna C., A. Rodríguez de S. y F. Albán A., «Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones,» *Ingeniería y competitividad,* vol. V, nº 1, pp. 16-26, 2003.

[18] A. K. Kaw, Mechanics of composite materials, Segunda ed., Taylor & Francis, 2006.

[19] W. D. Callister, Jr., Materials Science and Engineering. An introduction, John Wile & Sons, Inc., 2007.

[20] E. H. Kerner, «The elastic and thermoplastic proprieties of composite media,» vol. 69, p. 808, 1956.

[21] J. D. Eshelby, «The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems,» *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,* vol. 241, p. 376, 1957.

[22] J. D. Eshelby, «The elastic field outside of elliptical inclusion,» *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,* vol. 252, nº 1271, pp. 561 - 569, 1959.

[23] J. D. Eshelby, «Elastic inclusions and inhomogeneities,» *Progress in Solid Mechanics,* vol. 2, pp. 89 - 140, 1961.

[24] S. Iijima, «Helical microtubules of graphitic carbon,» *Nature,* vol. 354, pp. 56-58, 1991.

[25] V. J. Cruz Delgado, C. A. Ávila Orta, O. Pérez Camacho, M. García Zamora, V. E. Comparán Padilla y F. J. Medellín Rodríguez, «Funcionalización de nanotubos de carbono para la preparación de nanocompuestos poliméricos,» *Ide@s CONCYTEG,* pp. 675-692, Junio 2011.

[26] M. Treacy, T. Ebbesen y J. Gibson, «Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes,,» *Nature,* vol. 381, pp. 678-680, 1996.

[27] D. Qian y G. J. Wagner, «Mechanics of carbon nanotubes,» *Applied Mechanics Reviews,* pp. 495-533, 2002.

[28] J. Newell, Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2010.

[29] D. R. Askeland, Ciencia e ingeniería de los materiales, Tercera ed., Missouri: International Thomson Editores, 1998.

[30] U. G. Díaz Astudillo, «Evaluación del efecto de mezcla de partículas con diferentes propiedades en superficies metálicas recubiertas por triboadhesión,» *Tesis de maestría,* 2010.

[31] J. M. Dealy y K. F. Wissbrun, Melt rheology and its role in plastics processing: theory and applications, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

[32] H. A. Barnes, A handbook of elementary rheology, Cambrian Printers, 2000.

[33] H. A. Barnes, J. F. Hutton y K. Walters, An introduction to rheology, Elsevier Science Publishers B.V., 1993.

[34] R. Rosas Machorro, «Diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo para la aplicación de ultrasonido en pruebas reométricas,» *Tesis de pregrado,* 2014.

[35] L. V. Woodcock, «Developments in the non-newtonian rheology of glass forming systems,» *Lecture notes in physics. Molecular dynamics and relaxation phenomena in glases,* vol. 277, pp. 113-124, 1985.

[36] A. Dietzel, Microsystems for pharmatechnology. Manipulation of fluids, particles, droplets, and cells, Springer, 2016.

[37] G. Segré y A. Silberberg, «Radial particle displacements in Poiseuille flow of suspensions,» *Nature,* nº 189, pp. 209-210, 1961.

[38] G. Segré y A. Silberberg, «Behavior of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow,» *Fluid Mechanic,* nº 14, pp. 115-157, 1962.

[39] D. Di Carlo, D. Irimia, R. G. Tompkins y M. Toner, «Continuous inertial focusing, ordering, and separation of particles in microchannels,» *PNAS,* vol. 104, nº 48, pp. 18892-18897, 2007.

[40] K. Bauckhage, «The building mechanism of chains of spheres in Poiseuille flow - a model for the building mechanism of red cells chains,» *Biorheology,* vol. 12, pp. 329-334, 1975.

[41] B. Hans-Jürgen y M. K. Karlheinz Graf, Physics and chemistry of interfaces, Berlin: Wiley-VCH, 2003.

[42] H. Tan, L. Y. Jiang, Y. Huang, B. Liu y K. C. Hwang, «The effect of van der Waals-based inferface cohesive law on carbon nanotube-reinforced composite materials,» *Composites Science and Technology,* nº 67, pp. 2941-2946, 2007.

[43] C. Li y T.-W. Chou, «Elastic moduli of multi-walled carbon nanotubes and the effect of van der Waals forces,» *Composites science and technology,* nº 63, pp. 1517-1524, 2003.

[44] M. Herrera Barrera, «Bases para el diseño de catéteres intravenosos de material compuesto particulado con DLC o nanotubos de carbono,» *Tesis de maestría,* 2013.

[45] M. Farshchi Tabrizi, «On the adhesion between fine particles and nanocontacts: an atomic force microscope study,» *Tesis de doctorado,* 2007.

[46] R. Jerez Mesa, J. A. Travieso Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué y G. Gomez Gras, «Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier,» *Mechatronics,* nº 36, pp. 119-126, 2016.

[47] M. E. Mackay, Z. R. Swain, C. R. Banbury, D. D. Phan y D. A. Edwards, «The performance of the hot end in a plasticating 3D printer,» *Journal of Rheology,* vol. 61, nº 229, 2017.

[48] L. Tin Sin, A. Razak Rahmat y R. W. A. W. Abdul, Polylactic Acid. PLA biopolymer technology and applications, Elsevier, 2012.

[49] Q. Fang y M. A. Hanna, «Rheoloical properties of amorphous and semicrystalline polylactic acid polymers,» *Industrial crops and products,* nº 10, pp. 47-53, 1999.

[50] N. S. Bounoua y E. Lemaire, «Fiber suspension rheology,» de *Condensed matter*, Paris, 2014.

[51] G. Raj, E. Balnois, C. Baley y Y. Grohens, «Interfacial studies of polylactic acid (PLA)/Flax biocomposite: From model surface to fibre treatment,» de *International Conference on Composite Materials*, Lorient, 2009.

[52] L. Behalek, P. Lenfeld, M. Seidl, J. Bobek y A. Ausperger, «Friction propierties of composites with natural fibres, synthetic and biodegradable polymer matrix,» nº 10, pp. 23 - 25, 2012.

[53] Y. A. Çengel, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, Ciudad de México: McGraw-Hill, 2006.

[54] S. Bal y S. S. Samal, «Carbon nanotube reinforced polymer composites. A state of the art,» *Bulletin Material Science,* pp. 379-386.

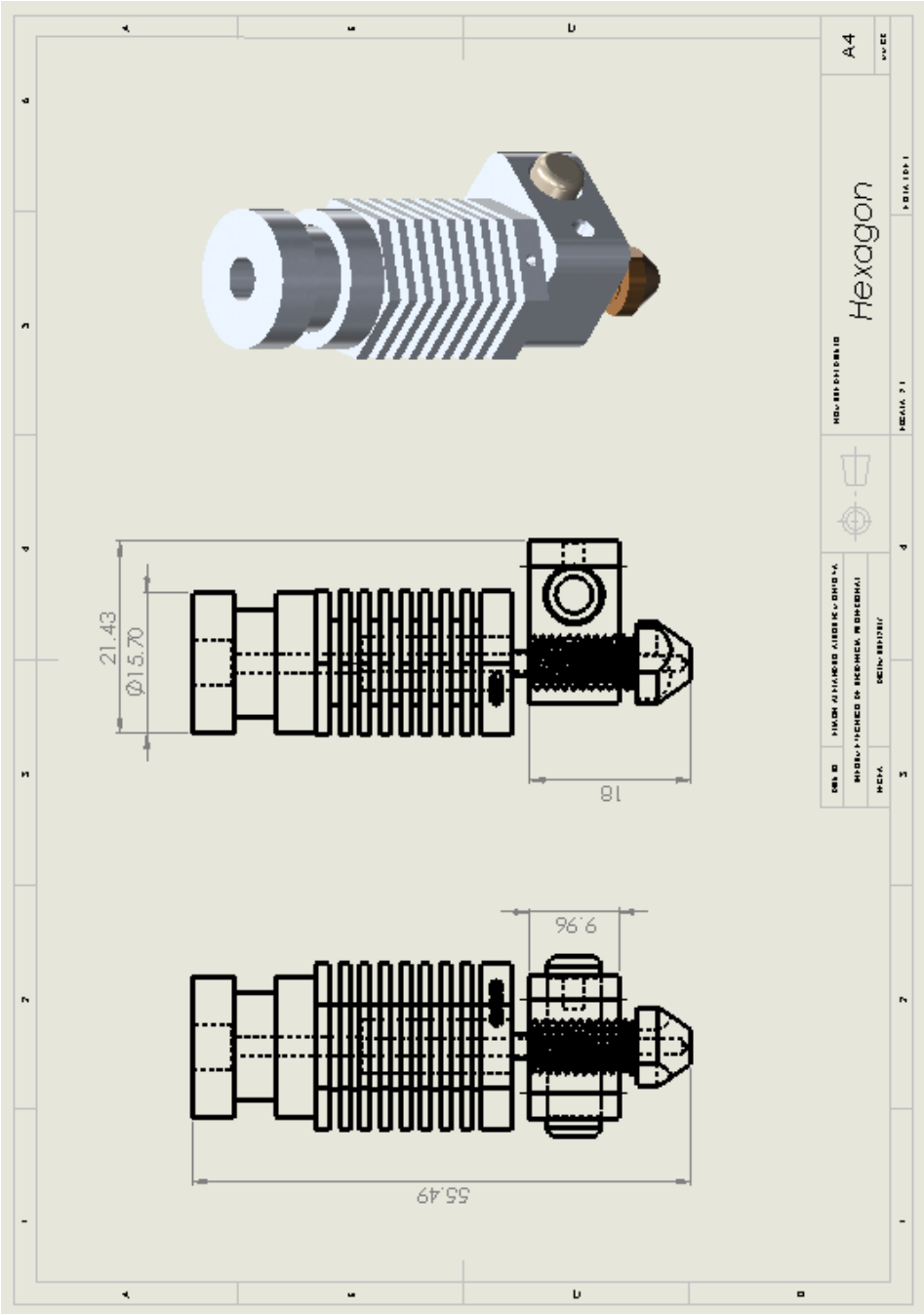
[55] C. J. Espinosa González, A. B. Espinoza Martínez, C. A. Ávila Orta y G. Martínez Colunga, «Dispersión de nanotubos de carbono en polímeros. Limitaciones y retos,» *Ide@s CONCYTEG,* pp. 760-771, 2011.

[56] M. Moniruzzaman y K. I. Winey, «Polymer nanocompistes containing carbon nanotubes,» *Macromolecules,* vol. 39, pp. 5194-5205, 2006.

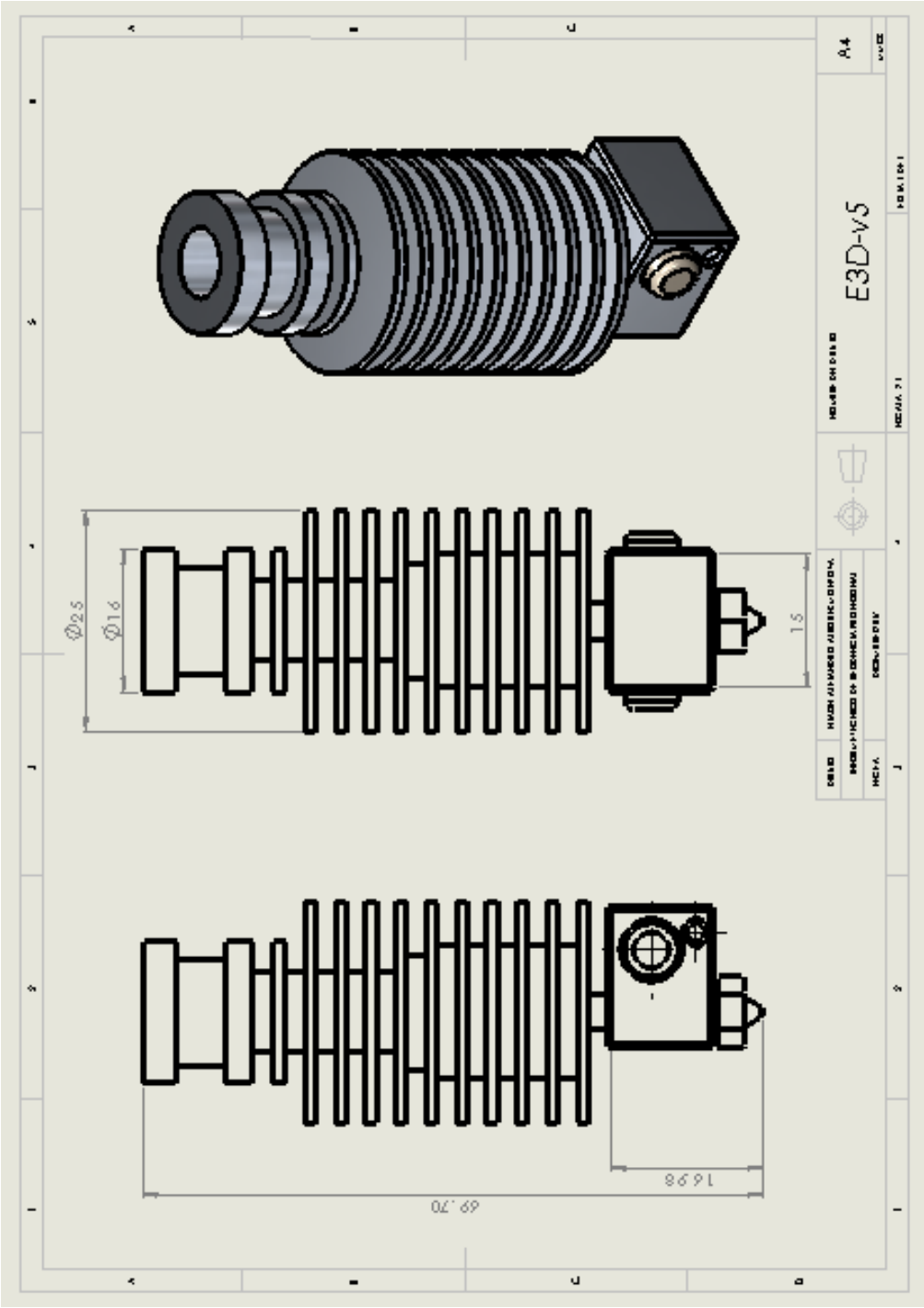
[57] Z. Tadmor y C. G. Gogos, Principles of polymer processing, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

APÉNDICE A

FICHA TÉCNICA *HEXAGON*

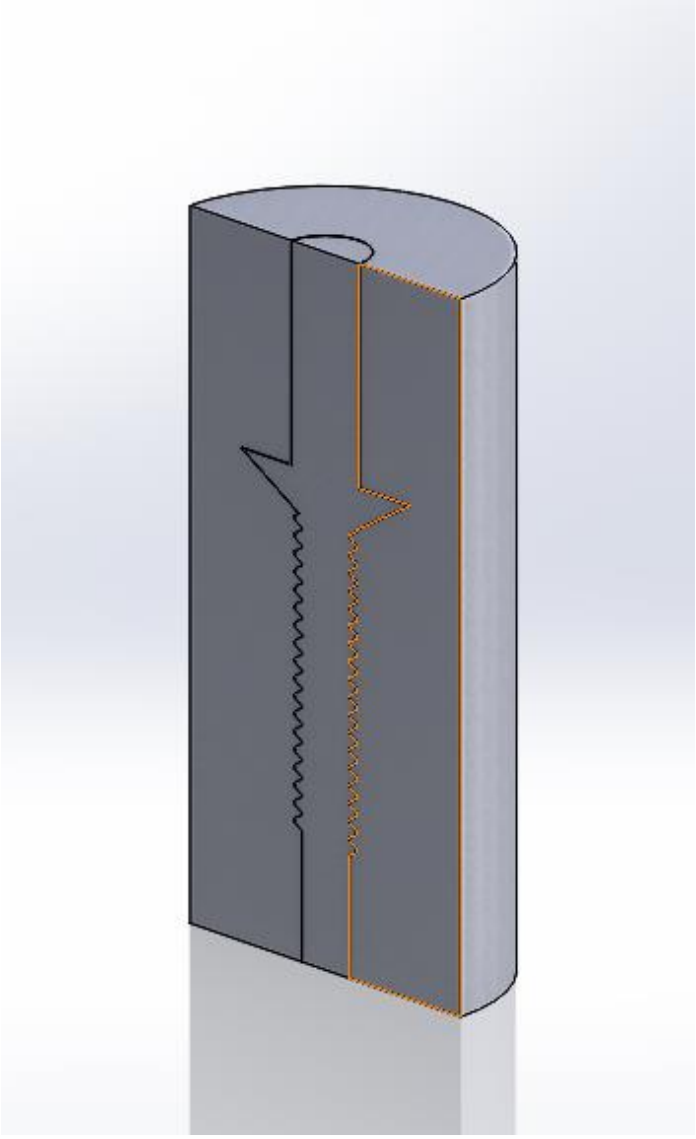


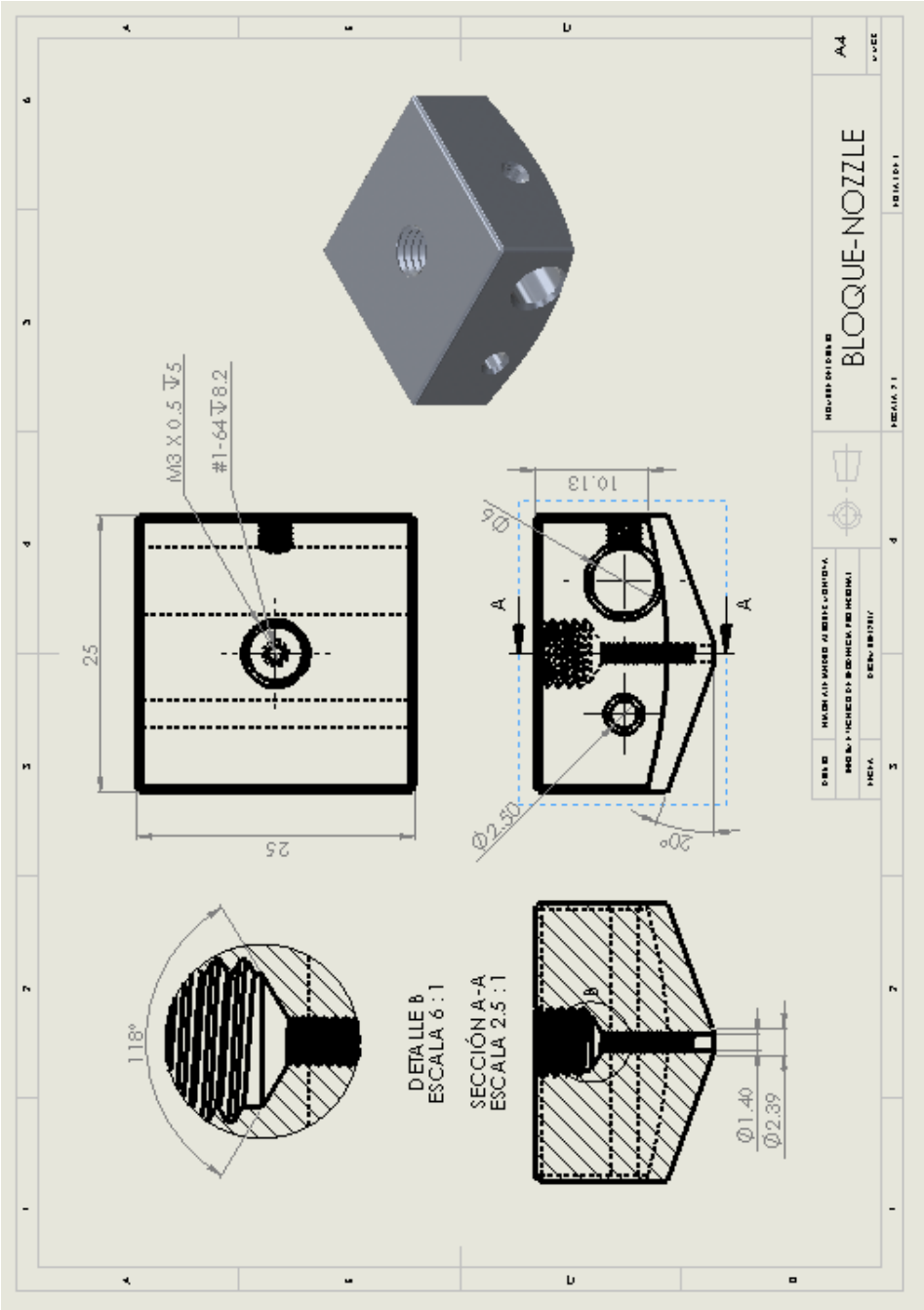
FICHA TÉCNICA *E3D-V5*



APÉNDICE B

GEOMETRÍA PARA LA SIMULACIÓN EN ANSYS 17.0



APÉNDICE C

FICHA TÉCNICA DEL BLOQUE DE FUNDICIÓN