

Evaluación del comportamiento mecánico del PLA reforzado con partículas, obtenidas por impresión en 3D, para la fabricación de un prototipo industrial



Jennifer Lizeth Sanguino Virviescas

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Pamplona, Norte de Santander , Colombia

17 de Diciembre de 2019

Evaluación del comportamiento mecánico del PLA reforzado con partículas, obtenidas por impresión en 3D, para la fabricación de un prototipo industrial



Jennifer Lizeth Sanguino Virviescas

Tesis o trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
Dr. Bladimir Ramón Valencia

Codirector:
Dr. Gonzalo Moreno

Línea de Investigación:
Procesos avanzados de manufactura

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Pamplona, Norte de Santander , Colombia

17 de Diciembre de 2019

Dedicatoria

¡Todo esto es dedicado especialmente a mis padres, hermanos y a mi pareja!

A mi mamá

Todo esto ha sido posible por ti, tú que me diste la vida y me enseñaste a luchar cada día. Hace mucho tiempo que no te veo con mis ojos, pero en mi mente y en mi corazón estás igual de presente que siempre. Mamá, eres la mano que me sostiene y la luz que me ilumina, nunca dejes de guiarme. Esto es para ti con mucho cariño y amor. Te amare y extrañare toda mi vida ¡mamá!

A mi papá

Gracias por tu paciencia y esfuerzo que me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades, por confiar y creer siempre en mí. ¡Gracias papá!

A mis hermanos

Wilson y Leidy por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias por apoyarme siempre, gracias por ser los mejores amigos y hermanos. Con ustedes todo, sin ustedes nada. Ustedes son mi vida ¡Los amo con mi alma!

A mi pareja

*A lo largo de mi carrera me di cuenta de que hay muchas cosas para las que soy buena, encontré destrezas y habilidades que tenía guardadas en mí; Sin embargo, lo verdaderamente valioso que pude descubrir es que por más que se disfrute trabajar solo, siempre se obtendrá un mejor resultado si lo realizado es con la ayuda y compañía perfecta. Por esto mismo, quiero dedicar esta tesis a mi pareja, esa persona que estuvo animándome y haciendo de lo difícil algo capaz.
¡A ti amor gracias!*

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien llena mi vida de bendiciones, a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

De manera especial a mi tutor de tesis, el Ph. D Bladimir Ramón Valencia, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Bucaramanga, al profesor M.Sc. Sergio Gómez, a la Universidad de los Andes en la ciudad de Bogotá, mi sincero agradecimiento pues nos abrieron las puertas de sus laboratorios y permitieron desarrollar los objetivos de esta investigación.

De igual manera mi profundo agradecimiento a la Universidad de Pamplona, a toda la Facultad de Ingeniería Mecánica, a mis profesores en especial al M.Sc. Edison Martínez, M.Sc. Holger Cagua, Ph. D Juan Carlos Serrano, Ph. D Rafael Bolivar, Ph. D Gonzalo moreno y Ing. Feliz Ortiz Garzón, y al estudiante José Antonio Velazco, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente, y no menos importante, doy mi más sincero agradecimiento a mi colega y mejor amigo Duván Mogollón. El que conozca el verdadero sentido de la amistad sabrá que cuando encuentras alguien especial que siempre está contigo en las buenas y malas le darás el mayor y verdadero sentimiento tu más y sincera amistad. Gracias amigo por siempre estar ahí y ayudarme de una manera desinteresada.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
FUNDAMENTOS TEORICOS	16
2.1 Materiales.....	16
2.1.1 Materiales poliméricos	16
2.1.2 Clasificación general de los polímeros	17
2.1.3 Materiales compuestos.....	18
2.1.4 Clasificación de los materiales compuestos según su refuerzo.....	18
2.1.5 Clasificación de los materiales compuestos según su matriz.....	20
2.1.6 La anisotropía del material compuesto	22
2.1.7 Materiales avanzados	22
2.2 Producción rápida de prototipos	22
2.2.1 Producción de prototipos virtuales.....	23
2.2.2 Procesos sustractivos.....	24
2.2.3 Procesos aditivos.....	24
2.3 Introducción del Modelado por deposición fundida FDM- Impresión 3D	27
2.3.1 Aplicaciones de la impresión 3D.	27
2.4 Filamentos para impresión 3D tecnología FDM.....	28
2.4.1 Ácido Poliláctico (PLA).....	28
2.4.2 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	28
2.4.3 Alcohol Polivinilo (PVA)	28
2.4.4 Tereftalato de polietileno (PET)	29
2.4.5 Policarbonato (PC).....	29
2.4.6 Co-Poliéster Termoplástico De carácter flexible (TCP FLEX)	29
2.5 Proceso de impresión 3D con tecnología FDM	29
2.6 Parámetros para proceso de impresión 3D.....	30
2.6.1 Velocidad de impresión	30
2.6.2 Temperatura de la base de impresión.....	30
2.6.3 Temperatura del extrusor	31
2.6.4 Relleno	31
2.6.5 Número de perímetros.....	31

2.6.6	Altura de capa	32
2.6.7	Ángulo de impresión	32
2.6.8	Diámetro de la boquilla.....	33
2.6.9	Uso de ventilador de capa	33
2.7	Comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante tecnología FDM	33
2.8	Antecedentes de fabricación en impresión 3D de materiales compuestos.....	34
OBJETIVOS		39
3.1	Objetivo General	39
3.2	Objetivos Específicos.....	39
METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL		40
4.1	Materiales	41
4.1.1	PLA	41
4.1.2	MetalFil - Classic Copper	41
4.1.3	StoneFil	42
4.1.4	EasyWood	42
4.2	Propiedades de los filamentos.....	42
4.3	Diseño de probeta.....	44
4.3.1	Configuración de los parámetros de impresión.....	47
4.3.2	Código G.....	49
4.4	Proceso de impresión	49
4.5	Caracterización mecánica	53
4.5.1	Tracción	53
4.5.2	Microscopia electrónica de barrido.....	58
4.5.3	CES EduPack	60
4.5.4	Simulación método elementos finitos ANSYS.....	61
ANÁLISIS DE RESULTADOS		62
5.1	Análisis ensayos de tracción	63
5.1.1	Ensayo de tracción PLA.....	63
5.1.2	Ensayo de tracción PLA/80%COBRE.....	66
5.1.3	Ensayo de tracción PLA/50%ARCILLA.....	68
5.1.4	Ensayo de tracción PLA/40%COCO	71
5.1.5	Ensayo de tracción PLA/40%CEDRO.....	73

5.1.6 Comparación de los materiales	76
5.2 Microscopia electrónica de barrido	79
5.2.1 Análisis morfológico PLA/80%COBRE	79
5.2.2 Análisis morfológico PLA/50%ARCILLA	80
5.2.3 Análisis morfológico PLA/40%COCO.....	81
5.2.4 Análisis morfológico PLA/40%CEDRO	82
5.3 CES EduPack.....	83
5.4 Simulación	88
5.4.1 Diseños.....	94
5.5 Prototipo.....	95
CONCLUSIONES	97
BIBLIOGRAFIA	98
ANEXOS	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos del fabricante [Autor]	43
Tabla 2. Dimensiones del diseño de la probeta.....	45
Tabla 3. Especificaciones técnicas impresora[Autor]	50
Tabla 4. Impresión probetas PLA transparente[Autor].....	51
Tabla 5. Impresión probetas PLA-COBRE[Autor].....	52
Tabla 6. Impresión probetas PLA-ARCILLA[Autor].....	52
Tabla 7. Impresión probetas PLA-CEDRO[Autor]	52
Tabla 8. Impresión probetas PLA-COCO[Autor].....	53
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la maquina universal MTS[Autor].....	54
Tabla 10. Mediciones de probetas [Autor].....	56
Tabla 11. Especificaciones técnicas del equipo SEM [Autor].....	59
Tabla 12. Densidades de los materiales [Autor]	61
Tabla 13. Probetas Representativas de los materiales.....	76
Tabla 14. Oblicuidad y calidad ortogonal [40]	90
Tabla 15. Parámetros impresión prototipo [Autor]	95

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación1. $\rho = mv$	61
-------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representaciones esquemáticas de las diversas características geométricas y espaciales de las partículas de la fase dispersa o refuerzo que pueden influir en las propiedades de los compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación[6].....	18
Figura 2. Esquema de clasificación para los diversos tipos compuestos[6]	19
Figura 3. Ejemplos clases de compuestos[7]	19
Figura 4. Clasificación Materiales Compuestos según su matriz[11].....	21
Figura 5. Clasificación Prototipado rápidos [13].....	23
Figura 6. Pasos computacionales en la producción de un archivo de estereolitografía. (a) Descripción tridimensional de la pieza. (b) La pieza se divide en rebanadas (sólo se muestra una de 10). (c) Se planea el material de soporte. (d) Se determina un conjunto de direcciones de herramientas para manufacturar cada rebanada. También se muestra la trayectoria del extrusor en la sección A-A a partir de (c) para una operación de modelado por deposición de material fundido[9].....	24
Figura 7. Esquema de Estereolitografía [14]	25
Figura 8. Esquema de Sinterización selectiva por láser [14]	25
Figura 9. Esquema de Fabricación por corte y laminado[14].....	26
Figura 10. Proceso de modelado por deposición fundida (esquemático)[13].....	26
Figura 11. Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin [15].....	27
Figura 12. Proceso de impresión [17]	29
Figura 13. Relleno (a) Tipos de patrón, (b)Porcentaje de relleno[13]	31
Figura 14. Influencia del espesor de capa en el acabado superficial[17].....	32
Figura 15. Esquemática de la impresión 3D ejemplares planos, en el borde y vertical [19].....	32
Figura 16. Ángulos de deposición[18].....	33
Figura 17. Representación de las uniones entre hilos en una pieza fabricada mediante FDM[20]	34
Figura 18. Esquema grafico de los esfuerzos y el comportamiento de la pieza[20].....	34
Figura 19. Metodología de investigación [Autor].....	40
Figura 20. Carrete PLA [Autor].....	41
Figura 21. Carrete MetalFil [FormFutura].....	41
Figura 22. Carrete StoneFil [FormFutura]	42
Figura 23. Carrete EasyWood (a). Cocó y (b). Cedro [Fuente: FormFutura].....	42
Figura 24. Dimensiones de Tipos de probetas[35]	44
Figura 25. Diseño probeta [Autor].....	45
Figura 26. Diseño CAD [Autor]	46
Figura 27. Probeta exportada desde Solidworks en modelo 3D formato STL a programa Repetier Host [Autor].....	46
Figura 28. Configuración de relleno[Autor]	47
Figura 29. Configuración de falda y borde[Autor]	48
Figura 30. Configuración de velocidad[Autor].....	48
Figura 31. Configuración de capas y perímetros[Autor]	48
Figura 32. Estadísticas de impresión[ASTMD638].....	49
Figura 33. G-CODE[Autor].....	49

Figura 34. Impresora 3D [Autor].....	50
Figura 35. Proceso impresión 3D [Autor].....	51
Figura 36. Velocidad del ensayo de tensión[ASTMD638].....	53
Figura 37. Maquina universal de ensayos MTS[Autor].....	54
Figura 38. Toma de mediciones [Autor].....	55
Figura 39. Montaje Ensayo de Tracción[Autor].....	55
Figura 40. Curva representativa de esfuerzo/deformación[7].....	57
Figura 41. Curvas tensión-deformación de polímeros; a) frágiles, b) dúctiles, c) elastómeros[11].....	58
Figura 42. La tenacidad de una aleación o compuesto depende de una combinación de resistencia y ductilidad[12].....	58
Figura 43. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV[36].....	59
Figura 44. Preparación de las muestras [Autor].....	60
Figura 45. Montaje análisis de muestra SEM [Autor].....	60
Figura 46. Toma de masas [Autor].....	61
Figura 47. Probetas antes del ensayo de tracción[Autor].....	62
Figura 48. Probetas después del ensayo de tracción[Autor].....	62
Figura 49. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA[Autor].....	63
Figura 50. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA [Autor].....	64
Figura 51. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA [Autor].....	64
Figura 52. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA [Autor].....	65
Figura 53. Análisis de la probeta uno- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA [MTS].....	65
Figura 54. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/80%COBRE[Autor].....	66
Figura 55. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/80%COBRE[Autor].....	67
Figura 56. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/80%COBRE[Autor].....	67
Figura 57. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/80%COBRE[Autor].....	67
Figura 58. Análisis de la probeta dos- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/80%COBRE [MTS].....	68
Figura 59. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/50%ARCILLA[Autor].....	68
Figura 60. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/50%ARCILLA[Autor].....	69
Figura 61. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/50%ARCILLA[Autor].....	69
Figura 62. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/50%ARCILLA[Autor].....	70
Figura 63. Análisis de la probeta cuatro- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/50%ARCILLA[MTS].....	70
Figura 64. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%COCO[Autor].....	71
Figura 65. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/40%COCO[Autor].....	72
Figura 66. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/40%COCO[Autor].....	72
Figura 67. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/40%COCO[Autor].....	72
Figura 68. Análisis de la probeta uno- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%COCO[MTS]... ..	73
Figura 69. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%CEDRO[Autor].....	74
Figura 70. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/40%CEDRO[Autor].....	74
Figura 71. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/40%CEDRO[Autor].....	74
Figura 72. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/40%CEDRO[Autor].....	75
Figura 73. Análisis de la probeta tres- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%CEDRO[MTS].	75
Figura 74. Comparación de los materiales ensayados [Autor].....	76

Figura 75. Análisis comparativo de la resistencia a la tracción de los materiales [Autor]	77
Figura 76. Análisis comparativo del módulo de Young [Autor]	77
Figura 77. Análisis comparativo de la deformación a la rotura [Autor]	78
Figura 78. Análisis comparativo de la carga máxima aplicada [Autor]	78
Figura 79. SEM MAG 100X PLA/80%COBRE [Autor]	79
Figura 80. SEM MAG 1500X PLA/80%COBRE [Autor]	80
Figura 81. SEM MAG 505X PLA/50%ARCILLA[Autor]	80
Figura 82. SEM MAG 1500X PLA/50%ARCILLA [Autor]	81
Figura 83. SEM MAG 100X PLA/40%COCO[Autor].....	81
Figura 84. SEM MAG 100X PLA/40%CEDRO[Autor]	82
Figura 85. Análisis aplicativo Ces EduPack [Autor]	83
Figura 86. Densidad del PLA80%COBRE no encontrada en polímeros[Autor].....	83
Figura 87. Selección universo de materiales [Autor].....	84
Figura 88. Esfuerzo a la tracción vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor]	84
Figura 89. Módulo de Young vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor].....	85
Figura 90. Porcentaje de Elongación vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor]	85
Figura 91. Fichas técnicas Perfluoro elastomer-Terracota [Autor]	85
Figura 92. Esfuerzo a la tracción vs Densidad PLA/50%ARCILLA [Autor]	86
Figura 93. Módulo de Young vs Densidad PLA/50%ARCILLA [Autor].....	86
Figura 94. Porcentaje de Elongación vs Densidad PLA/50%ARCILLA [Autor]	87
Figura 95. Fichas técnicas copolimer - polyamide [Autor]	87
Figura 96. Módulo Workbench-Static Structural.....	88
Figura 97. Configuración de datos del material [Autor].....	88
Figura 98. Diseño 3D Solidworks de Férula para brazo[Autor].....	89
Figura 99. Pieza importada en design modeler[Autor].....	89
Figura 100. Oblicuidad del mallado[Autor].....	90
Figura 101. Calidad ortogonal del mallado [Autor].....	90
Figura 102. Baja calidad de malla [Autor].....	91
Figura 103. Alta calidad de malla (mallado seleccionado) [Autor].....	91
Figura 104. Simulación Deformación [mm] [Autor].....	92
Figura 105. Factor de seguridad [Autor].....	92
Figura 106. Esfuerzo equivalente de von mises[Autor].....	93
Figura 107. Factor de seguridad, esfuerzo equivalente de von mises del PLA/80%COBRE PLA/80%COBRE [Autor]	93
Figura 108. Diseños fallidos [Autor]	94
Figura 109. Archivo STL [Autor].....	95
Figura 110. Prototipo exportado desde Solidworks en modelo 3D formato STL a programa Repetier Host [Autor]	96
Figura 111. Simulación proceso de impresión prototipo [Autor]	96

RESUMEN EXTENDIDO

En este proyecto se trata de llevar un paso más a allá el modelado por deposición fundida, técnica actual con mayor auge en la industria de prototipado rápido. El PLA es uno de los materiales de impresión 3D-FDM más populares y utilizados, es muy fácil de imprimir en comparación con otros materiales. Además de esto, el PLA se ve a menudo como un material sostenible y seguro, se produce a partir de materias primas renovables y no se basa en combustibles fósiles, como el ABS. Algo positivo, considerando que el petróleo es un recurso finito.

La presente investigación se basa en el estudio de cuatro materiales compuestos, de matriz de PLA y refuerzos metálicos, cerámicos y fibras naturales, los cuales fueron impresos en forma de probetas según la norma ASTM D638 para ser ensayados a tracción.

Mediante la gráfica esfuerzo vs deformación, se exploraron las características y propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material, adicional a esto se analizó la morfología en la superficie de falla mediante SEM. Después de diferentes análisis se considera que los materiales compuestos aportan al PLA características propias de acuerdo al tipo de refuerzo establecido. Debido a estas cualidades se consideró que los materiales compuestos impresos en 3D, pueden suplir bastante bien aplicaciones superficiales en medicina, actualmente se ha venido utilizando el PLA en impresiones 3D-FDM de férulas de brazos, pero por su alta resistencia a la tracción ocasiona que el material sea frágil y se fracture. El PLA/50% ARCILLA es un material prometedor de acuerdo a este tipo de aplicaciones.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El hombre, los materiales y la ingeniería han evolucionado en el transcurso del tiempo y continúan haciéndolo. El mundo actual es de cambios dinámicos y los materiales no son la excepción. Actualmente, los plásticos son ampliamente utilizados y se han convertido en uno de los cuatro pilares en los campos de materiales, en paralelo con el acero, la madera y el cemento [1]. Los plásticos son compuestos de polímeros sintéticos, en su mayoría hechos de fuentes petroquímicas, tales compuestos tienen una alta masa molecular, plasticidad y se agregan ciertos químicos para aumentar el rendimiento y la eficiencia de los productos [2]. La producción de plásticos se acompaña de un alto consumo de recursos y generación de residuos [3]. Existe un interés creciente en el desarrollo de plásticos biodegradables para reducir la dependencia del agotamiento de los combustibles fósiles y proporcionar una alternativa sostenible [4]. El uso de los polímeros biodegradables tales como el almidón puede ser una solución interesante debido a su bajo costo, abundancia, y fácil biodegradabilidad. Un ejemplo de este tipo de material es el PLA, es uno de los biopolímeros más prometedores debido al hecho de que los monómeros pueden producirse a partir de materia prima renovable no tóxica [5].

La técnica de impresión 3D, nace de la necesidad de desarrollar nuevos procesos de producción que optimicen los recursos de materia prima y además brinden la facilidad de obtener productos diversos con casi cualquier forma, partiendo de un modelo digital computarizado. Los métodos de fabricación aditiva (AM) comúnmente utilizados para plásticos incluyen modelado por deposición fundida (FDM), fotopolimerización en cubas, fusión en lecho de polvo y chorro de material [7]. Cada uno de estos métodos ofrece ventajas y desventajas únicas. FDM se distingue de los otros métodos como el enfoque más fácil y de bajo costo. El proceso es generalmente lento y las piezas fabricadas exhiben altos niveles de anisotropía. Sin embargo, una serie de propiedades hacen que FDM sea un método AM altamente flexible. En primer lugar, permite el procesamiento de muchos sistemas de materiales diferentes. En segundo lugar, ofrece una configuración directa de múltiples materiales donde, se pueden extruir materiales diferentes y se pueden componer en configuraciones complejas. Estos aspectos únicos de FDM han atraído una atención significativa tanto de usuarios de bajo nivel, como de investigadores hacia la realización de productos funcionales novedosos.

Resulta imprescindible conocer las propiedades de los productos obtenidos mediante este proceso, uno de los ensayos que permiten conocer su esfuerzo máximo es el ensayo de tracción. Sin embargo, existen muchos factores que determinan las propiedades físicas de una pieza generada en un sistema de impresión 3D, como pueden ser: el tipo de material depositado, porcentaje de relleno, la homogenización de las capas del material, la densidad, el patrón, la orientación del relleno y la configuración realizada al equipo como: temperatura, velocidad y flujo; hace que las propiedades mecánicas del sólido impreso dependan directamente de los parámetros utilizados en su fabricación.

La industria de la impresión 3D se destaca en el sector de prototipado de elementos decorativos o maquetas, pero actualmente representa una revolución en términos productivos. Las mejoras actuales de los filamentos con refuerzos de partículas de fibras, cerámicas y metales; podrían ofrecer una combinación favorable para el desarrollo futuro de nuevas aplicaciones de la impresión 3D y contribuir

en la innovación de nuevas posibilidades en la industria manufacturera. Como tal, existe una creciente necesidad de investigación sobre AM con plásticos que involucren sistemas de materiales novedosos, su diseño y procesamiento. Es esta la razón y objetivo principal de esta investigación, el suplir la necesidad de investigar filamentos novedosos a base de PLA con diferentes refuerzos. Además, el evaluar y analizar su comportamiento mecánico, para de esta manera buscar aplicaciones biomédicas e industriales y proponer y fabricar un prototipo.

Para la obtención y cumplimiento de los objetivos propuestos, se establecieron parámetros o factores de referencia, llegando a determinar la variabilidad existente en los datos obtenidos, de acuerdo al ensayo de tracción y análisis morfológico, entre cada uno de los materiales compuestos a base de PLA.

En el Capítulo II, se presenta información acerca de los materiales plásticos, materiales compuestos y procesos de prototipado rápido, donde, se explican sus categorías, condiciones y orden en que están subdivididos. Adicionalmente, se investigó y analizó los efectos de las variables y parámetros de impresión importantes, que se tuvieron en cuenta en el momento de la impresión 3D. Finalmente se incluye un estudio actual de investigaciones relevantes, las cuales fueron de gran aporte para el desarrollo del proyecto.

En el Capítulo III, se podrá observar el principal objetivo y los objetivos generales de esta investigación que se orientó en la evaluación y comprensión de los comportamientos mecánicos de las piezas compuestas de PLA impresas con FDM, llegando a la obtención de un prototipo, con una aplicación biomédica.

En el Capítulo IV, se muestra el desarrollo experimental que se realizó durante toda la investigación; también se presentan los materiales y equipos que se utilizaron. Se muestran las diferentes técnicas analíticas, pruebas destructivas mediante ensayos de tracción, análisis morfológico por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), selección de la aplicación por medio del software CES EduPack y por último diseño y simulación en ANSYS.

En el Capítulo V, se presentan los resultados que se obtuvieron con las técnicas de caracterización, también se muestra la discusión de cada uno y generar la comparación de los datos más representativos de acuerdo a los materiales analizados. Cada propiedad es aumentada o disminuida por un tipo de refuerzo análisis que se comprenderá en el capítulo. Adicional a lo anterior se realizó la simulación de la aplicación encontrada por medio de Ces EduPack y finalmente se observa el prototipo construido mediante la técnica FDM.

En el Capítulo VI se proporcionan las conclusiones adquiridas durante todo el proceso investigativo, además, orienta en los posibles y futuros trabajos que puede continuar gracias a la investigación establecida.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Materiales

Sustancias de las que algo está compuesto o hecho[1]. La disciplina de la ciencia de los materiales implica investigar la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales. Por el contrario, la ingeniería de los materiales se fundamenta en las relaciones propiedades-estructura y diseña o proyecta la estructura de un material para conseguir un conjunto predeterminado de propiedades. Los materiales sólidos se han agrupado convenientemente en tres categorías básicas: metales, cerámicas y polímeros. Este esquema se basa principalmente en la composición química y la estructura atómica. Por lo general, la mayoría de los materiales encajan en un grupo u otro, aunque hay materiales intermedios. Además, están los materiales compuestos, que son combinaciones de ingeniería de dos o más materiales diferentes. Otra categoría son los materiales avanzados: los utilizados en aplicaciones de alta tecnología, como semiconductores, biomateriales, materiales inteligentes y materiales de nanoingeniería[6].

2.1.1 Materiales poliméricos

Los polímeros son cadenas enlazadas de unidades repetidas con enlaces covalentes (tipo de enlace químico, que ocurre cuando dos átomos se enlazan para formar una molécula, compartiendo electrones pertenecientes de su capa más superficial, alcanzando el “octeto estable”). Los bloques de construcción que se repiten en la cadena se llaman monómeros. Conforme los monómeros empiezan a conectarse entre sí para formar cadenas, se convierten en oligómeros. Conforme más monómeros se agregan a la cadena oligómera, ésta crece y al final se convierte en un polímero. Un polímero puede tener 10.000 o 1'000.000 de unidades monómeras repetidas en una cadena. Los átomos enlazados covalentemente (usualmente el carbono) incluyen el largo centro repetido de la cadena llamado esqueleto del polímero. Los átomos anexados al esqueleto se llaman grupos laterales o sustituyentes. El hidrógeno es el grupo lateral más común, pero los grupos metilo, los anillos de benceno, las moléculas de hidróxido, los heteroátomos, o incluso otras cadenas de polímeros pueden fungir como grupos laterales de igual manera[7].

A lo largo de cientos de años se han utilizado polímeros naturales procedentes de plantas y animales, pero solo hasta el siglo XX se desarrollaron numerosos polímeros, sintetizados a partir de pequeñas moléculas orgánicas. Muchos plásticos, cauchos y materiales fibrosos son polímeros sintéticos[8]. El petróleo es la principal materia prima para la mayoría de los polímeros. Cuando el petróleo crudo se destila, los valiosos productos del petróleo se retiran y los compuestos menos valiosos con peso molecular más alto se dejan para calentarlos a través de un catalizador. Como resultado, los hidrocarburos más grandes se rompen en moléculas más pequeñas a través de un proceso denominado agrietamiento. Estas moléculas más pequeñas fungen como los bloques de construcción iniciales para los monómeros que se convertirán en polímeros. Uno de los monómeros más comunes, es el etileno, también se obtiene del gas natural [8].

2.1.2 Clasificación general de los polímeros

Los materiales compuestos por polímeros se pueden dividir en tres grandes categorías: elastómeros, fibras y plásticos.

- ∞ Elastómeros. Los elastómeros consisten en una gran familia de polímeros amorfos que tienen una baja temperatura de transición vítrea. Es típica su capacidad para sufrir grandes deformaciones elásticas sin romperse; igualmente, son suaves y tienen módulos elásticos bajos. La estructura de los elastómeros es muy rugosa (torcida o rizada apretadamente). Se estiran, pero después regresan a su forma original tras retirar la carga. Una vez que el elastómero se enlaza transversalmente, ya no se le puede dar otra forma (por ejemplo, un neumático para automóvil)[9].
- ∞ Fibras. Una fibra polimérica es un polímero cuyas cadenas están extendidas en línea recta (o casi recta) una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje. Los polímeros ordenados en fibras, pueden ser hilados y usados como textiles. Las prendas de vestir, las alfombras y sogas están hechas de fibras poliméricas. Algunos de los polímeros que pueden ser empleados como fibras son el polietileno, polipropileno, nylon, poliéster, kevlar y nomex, poliacrilonitrilo, la celulosa y los poliuretanos, entre otros [9].
- ∞ Plásticos. Los plásticos son un grupo grande y variado de materiales sintéticos, que se procesan para darles forma por moldeo o deformación. Son todos aquellos polímeros cuyas propiedades son intermedias entre los elastómeros y las fibras. Se pueden dividir de acuerdo a su uso en: de uso general, plásticos de ingeniería y polímeros avanzados[10].
 - a) De uso general: Se fabrican en elevadas cantidades y se dedican a múltiples aplicaciones. Tienen propiedades intermedias que pueden ser parcialmente modificadas para una aplicación específica mediante aditivos o el adecuado procesamiento.
 - b) Plásticos de ingeniería. Tienen precios significativamente mejores como consecuencia de su menor volumen de producción. Se caracterizan por tener propiedades especiales para aplicaciones exigentes, normalmente presentan una alta cristalinidad. Compiten con los materiales mecánicos y con los cerámicos con la ventaja de su menor densidad y facilidad de procesamiento.
 - c) Polímeros avanzados. Son aquellos que se diseñan para satisfacer una aplicación concreta. Normalmente presentan alguna propiedad excepcional como por ejemplo alta conductividad eléctrica, biocompatibilidad o formación de cristales líquidos[10].

Los plásticos tienen una segunda clasificación; estos pueden dividirse en termoplásticos y termoestables, según sean los enlaces químicos de su estructura.

- d) Termoplásticos. A los termoplásticos es necesario calentarlos para darles su forma y después enfriarlos, de este modo adquieren y conservan la forma que se les dio. La mayoría de los termoplásticos están constituidos por cadenas principales muy largas de átomos de carbono, enlazados entre sí en forma covalente. Algunas veces, se enlazan también átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre en forma covalente con la cadena molecular principal [1]. A nivel molecular, a medida que aumenta la temperatura, las fuerzas de unión secundarias disminuyen (por el aumento

del movimiento molecular) de modo que el movimiento relativo de las cadenas adyacentes se facilita cuando se aplica una tensión. Los ejemplos de polímeros termoplásticos comunes incluyen polietileno, poliestireno, poli (tereftalato de etileno) y poli (cloruro de vinilo)[6].

- e) Termoestables. Los polímeros termoestables son polímeros de red. Se endurecen permanentemente durante su formación y no se ablandan al calentarse. Los polímeros de red tienen enlaces cruzados covalentes entre cadenas moleculares adyacentes. Durante los tratamientos térmicos, estos enlaces anclan las cadenas para resistir los movimientos vibratorios y rotativos de la cadena a altas temperaturas. Por lo tanto, los materiales no se ablandan cuando se calientan[6].

2.1.3 Materiales compuestos

La mayoría de los compuestos se han creado para mejorar las combinaciones de características mecánicas, como rigidez, tenacidad y resistencia a altas temperaturas y ambiente. Muchos materiales compuestos se componen de solo dos fases; uno se denomina matriz, que es continua y rodea la otra fase, a menudo llamada fase dispersa. La fase dispersa también llamada refuerzo, de ella dependen principalmente las propiedades mecánicas, y la fase continua o matriz, es la responsable de la resistencia térmica y ambiental del material, que engloba al refuerzo y hace del material una estructura monolítica. Las propiedades de los compuestos son una función de las propiedades de las fases constituyentes, sus cantidades relativas y la geometría de la fase dispersa. La geometría de fase dispersa en este contexto significa la forma de las partículas, el tamaño, distribución y orientación; Estas características se representan en la Figura 1.

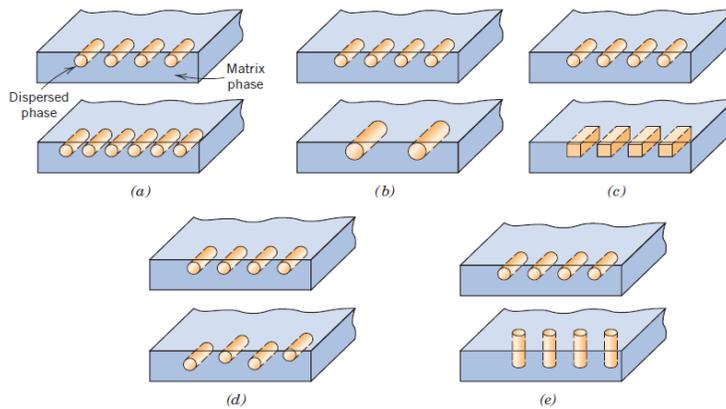


Figura 1. Representaciones esquemáticas de las diversas características geométricas y espaciales de las partículas de la fase dispersa o refuerzo que pueden influir en las propiedades de los compuesto: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación[6]

2.1.4 Clasificación de los materiales compuestos según su refuerzo

Un esquema simple para la clasificación de materiales compuestos se muestra en la Figura 2, que consta de tres clasificaciones principales: compuestos reforzados con partículas, reforzados con fibras y estructurales; Además, existen al menos dos subdivisiones para cada uno.

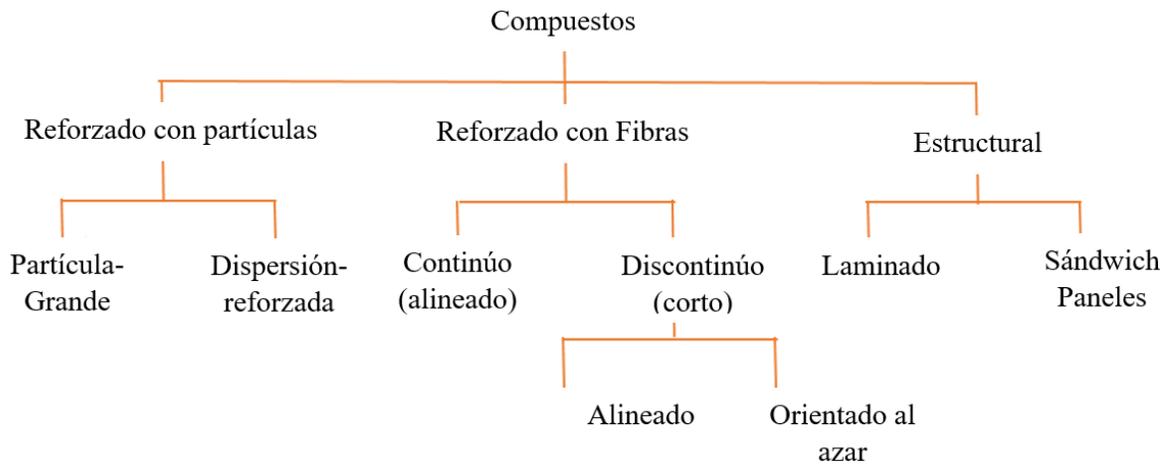


Figura 2. Esquema de clasificación para los diversos tipos compuestos[6]

La fase dispersa para los compuestos reforzados con partículas es equiaxial (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente las mismas en todas las direcciones); Para los compuestos reforzados con fibra, la fase dispersa tiene la geometría de una fibra (es decir, una gran relación longitud-diámetro). Los compuestos estructurales son combinaciones de compuestos y materiales homogéneos [8]. En la figura 2 se puede observar ejemplos de la clasificación de los compuestos.

Categoría del compuesto	Definición	Diagrama	Ejemplo
Reforzado con fibras	Compuesto en el que un material se forma de la matriz externa y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y débiles.		Compuestos epóxicos Kevlar
De partículas	Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas para reforzar la matriz.		Concreto
Laminares	Compuesto que se hace al alternar juntas con un adhesivo capas de distintos materiales.		Madera contrachapada
Híbrido	Compuesto hecho de otros materiales compuestos.		Concreto reforzado con barras de refuerzo

Figura 3. Ejemplos clases de compuestos[7]

Compuestos reforzados con partículas. Como se observa en la figura 2 los compuestos reforzados con dispersión y partículas grandes son las dos subclasificaciones de los compuestos reforzados con partículas. La distinción entre estos se basa en el mecanismo de refuerzo o refuerzo[6].

a) Compuestos reforzados por dispersión. Para los compuestos reforzados por dispersión, las

partículas son normalmente mucho más pequeñas, con diámetros entre 0.01 y 0.1 μm (10 y 100 nm). Las interacciones partícula-matriz que conducen al fortalecimiento ocurren a nivel atómico o molecular. El mecanismo de fortalecimiento es similar al del endurecimiento por precipitación. Mientras que la matriz soporta la mayor parte de una carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el movimiento de las dislocaciones. Por lo tanto, la deformación plástica se restringe de manera tal que mejoran el rendimiento y la resistencia a la tracción, así como la dureza. La fase dispersa puede ser metálica o no metálica[6].

b) Compuestos reforzados con partículas grandes. El término grande se usa para indicar que las interacciones partícula-matriz no pueden ser tratadas a nivel atómico o molecular; más bien, se usa la mecánica del continuo. Para la mayoría de estos compuestos, la fase de partículas es más dura y rígida que la matriz. Estas partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la fase de la matriz en la vecindad de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte de la tensión aplicada a las partículas, que soportan una fracción de la carga. El grado de refuerzo o mejora del comportamiento mecánico depende de una fuerte unión en la interfaz matriz-partícula[6].

⌘ Compuestos reforzados con fibras. Consisten de dos fases: la fibra y la matriz. En la mayoría de los casos, fibras fuertes y rígidas pero frágiles son puestas en una matriz tenaz pero más dúctil, resultando en un material con excelente proporción de resistencia-peso, rigidez y resistencia a la fatiga. El rol de la fibra es soportar cargas relevantes de tracción en la dirección longitudinal. Las fibras comunes utilizadas para el reforzamiento incluyen carbono, vidrio, polímeros de alto desempeño, poliéster, acero, titanio y tungsteno. El material matriz rodea a las fibras, las orienta para optimizar su desempeño colectivo, las protege de ataques ambientales y les transfiere la carga. Los compuestos reforzados con fibras son anisotrópicos con muy diferentes propiedades en la dirección de la alineación de la fibra (dirección longitudinal) desde la dirección perpendicular a la fibra (dirección transversal)[7].

⌘ Compuesto estructural. Normalmente está constituido de materiales tanto homogéneos como compuestos, cuyas propiedades dependen no solo de las propiedades de los materiales constituyentes sino también del diseño geométrico de los diversos elementos estructurales. Los compuestos laminares y los paneles sándwich son dos de los compuestos estructurales más comunes [6].

2.1.5 Clasificación de los materiales compuestos según su matriz

Atendiendo la naturaleza de la matriz, los materiales compuestos pueden clasificarse de acuerdo con el diagrama de la Figura 4, la matriz puede ser polimérica, cerámica o metálica; cada uno de estos grupos se subdivide a su vez con materiales específicos, como matriz orgánica de epoxi o de poliéster, o matriz metálica de aleación de aluminio o de titanio. La elección del tipo de matriz está condicionada fundamentalmente por la temperatura de servicio. Matrices poliméricas hasta 200 °C, algunos tipos especiales como las de poliimida pueden utilizarse hasta los 300 °C, matrices metálicas hasta casi la temperatura de fusión de la aleación correspondiente y matrices cerámicas, vítreas o policristalinas, para temperaturas elevadas, pudiendo utilizarse matrices de carbono para temperaturas extremas en atmósfera reductora[11].

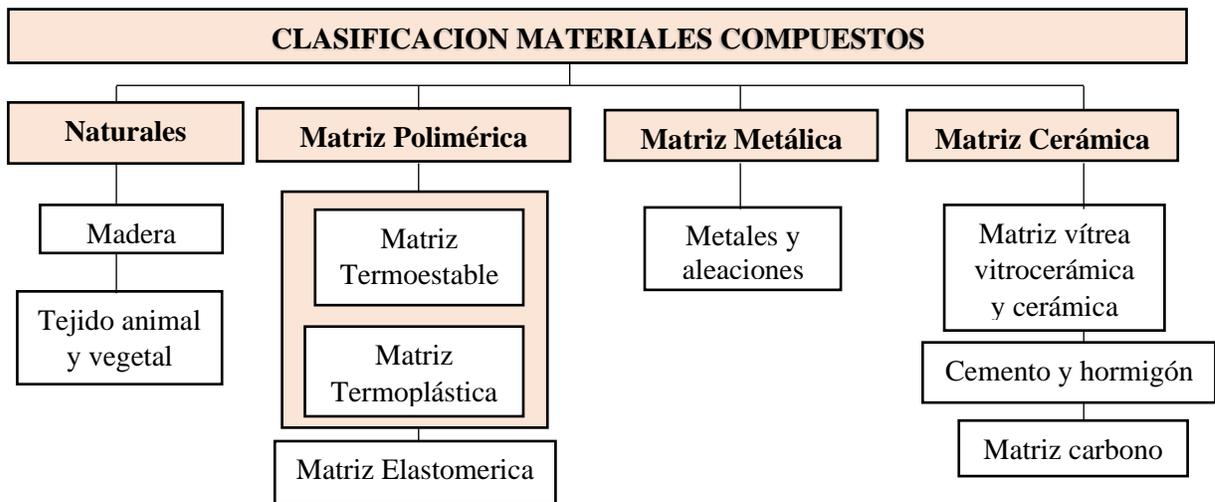


Figura 4. Clasificación Materiales Compuestos según su matriz[11]

- ⌘ Compuestos de Matriz Metálica (MMC). La matriz metálica más común es el aluminio debido a su alta resistencia específica y su relativo bajo costo. Comparadas con las matrices poliméricas, las matrices metálicas proporcionan alta resistencia, resistencia ambiental mejorada (incluyendo el hecho de que no se queman), conductividad térmica mucho más grande, resistencia a la abrasión mejorada y la capacidad de operar a temperaturas elevadas. Por lo general, los materiales empleados para matrices en compósitos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) son aluminio, aleación de aluminio y litio (más ligero que el aluminio), magnesio, cobre, titanio y superaleaciones [9].
- ⌘ Compuestos de Matriz Cerámica (CMC). Los compuestos de matriz cerámica funcionan para un propósito diferente al de otros materiales comentados en esta sección. Cuando las fibras de cerámico se añaden a una matriz de un material cerámico diferente, la tenacidad de la fractura del compuesto se incrementa significativamente mientras se mantiene la capacidad de soportar altas temperaturas y ambientes corrosivos. Por esta razón, los CMC generalmente reemplazan a los cerámicos estándares para aplicaciones en las que la tenacidad de la fractura es una preocupación principal. Los CMC ligeros también reemplazan a las superaleaciones, permitiendo una reducción de peso significativa[7].
- ⌘ Compuestos de Matriz Polimérica. Son los mejor caracterizados y los de mayor utilización industrial. Desde 1980, aviones civiles y militares incorporan progresivamente estos materiales en su estructura extrema, hasta un 40 por ciento del peso total. Se requiere todavía mejorar su «tolerancia al daño», o capacidad de la estructura para soportar los accidentes usuales de servicio (corrosión, impactos, etc.), sin una degradación significativa de sus propiedades[12]. Los materiales compuestos de matriz polimérica ofrecen una elevada resistencia y rigidez específicas, buen comportamiento a fatiga, elevado amortiguamiento estructural, expansión térmica baja o nula si el refuerzo es carbono. Con ellos es posible obtener geometrías muy complejas, reduciendo significativamente el número de elementos a integrar para formar un conjunto estructural [13]. Tiene tres funciones principales: 1. Mantener las fibras en su lugar y transferir los esfuerzos a las mismas mientras soportan la mayor parte de la carga, 2. Proteger las fibras contra daños físicos y del ambiente, 3. Reducir la propagación de grietas en el compósito por medio de mayor ductilidad y rigidez de la matriz plástica[9].

2.1.6 La anisotropía del material compuesto

En el ámbito de los materiales, es necesario conocer la definición de isotropía frente a anisotropía ya que esta influye de forma decisiva en el proceso de diseño, cálculo y fabricación. A nivel macroscópico, se entiende que una materia presenta un comportamiento isotrópico cuando sus propiedades no son dependientes de la dirección considerada. Por el contrario, un material presenta comportamiento anisotrópico cuando sus propiedades están fuertemente ligadas a la dirección considerada. Muchos de los materiales empleados en ingeniería, tales como metales, materiales cerámicos y plásticos, presentan, en general, un comportamiento isotrópico, lo cual facilita en gran medida el proceso de diseño, cálculo y dimensionamiento [11]. La anisotropía de un material, o cambio del valor de sus propiedades mecánicas, térmicas o eléctricas, según la dirección en que dicha propiedad se esté midiendo, es una característica fundamental de los materiales compuestos. Significa una mayor complejidad en el diseño, o puede significar la posibilidad de poder diseñar el material junto con la estructura, adaptados óptimamente a su función.

2.1.7 Materiales avanzados

Los materiales avanzados se utilizan en aplicaciones de alta tecnología. Estos incluyen semiconductores (que tienen conductividades eléctricas intermedias entre conductores y aislantes), biomateriales (que deben ser compatibles con los tejidos del cuerpo) también es usado este concepto cuando se trata de un material a base de materia prima renovable y biodegradable, materiales inteligentes (aquellos que detectan y responden a los cambios en sus entornos de manera predeterminada) y nanomateriales (aquellos que tienen estructuras características del orden de un nanómetro, algunas de las cuales pueden diseñarse a nivel atómico / molecular) [8].

2.2 Producción rápida de prototipos

En el desarrollo de un nuevo producto existe la necesidad invariable de producir un ejemplo único, o prototipo, de la parte (o sistema) diseñada, antes de asignar grandes cantidades de capital para nuevas instalaciones de producción o líneas de ensamble. Las razones principales de esta necesidad son el costo del capital, que es muy alto, y el tiempo que tarda el preparar los herramientas de producción. Por lo tanto, se requiere un prototipo de trabajo para evaluar el diseño y resolver problemas antes de que un producto o sistema complejo quede listo para su producción y comercialización. Una tecnología que acelera en gran medida el proceso iterativo de desarrollo de productos es la producción rápida de prototipos RP (*rapid prototyping*), también conocida como producción de prototipos rápidos o fabricación de sólidos de forma libre. A mediados de la década de 1980 empezó el desarrollo de la producción de prototipos rápidos. [9]. Las ventajas de esta tecnología son las siguientes: 1. Se pueden manufacturar modelos físicos de partes a partir de archivos de datos CAD (Computer Aided Design) en cuestión de horas, lo que permite evaluar con rapidez la capacidad de manufactura y la eficacia del diseño; de esta manera, la producción de prototipos rápidos sirve como una herramienta importante para visualizar y verificar conceptos. 2. Con los materiales adecuados, el prototipo se puede utilizar en operaciones de manufactura posteriores para producir las partes finales; de esta manera, la producción de prototipos rápidos también sirve como una importante tecnología de manufactura. 3. Las operaciones

de producción de prototipos rápidos pueden utilizarse con el propósito de fabricar herramientas reales para operaciones de manufactura; de esta manera es posible obtener herramientas en cuestión de días.

Los procesos de producción de prototipos rápidos se pueden clasificar en tres grupos principales: virtual, sustractivo y aditivo. La disponibilidad de tecnologías es muy variada. Se han encontrado y comparado diversas clasificaciones y a pesar de pequeñas divergencias, todas ellas presentan una división común en tres grandes bloques:

- ⌘ Líquidos (*Liquid based*). Resinas fotocurables, ceras fundidas, tintas de relleno, agua.
- ⌘ Partículas discretas (*Powder based*). Materiales semicristalinos, plásticos, metales y cerámicos.
- ⌘ Láminas sólidas (*Solid based*). Láminas de metal, plástico y papel, hilo de plástico amorfo.

Hay ligeras discrepancias respecto a la clasificación de la técnica de este trabajo, FDM. En la Figura 5, se abre una subdivisión en el bloque Líquido denominada Solidificación de material fundido[15].

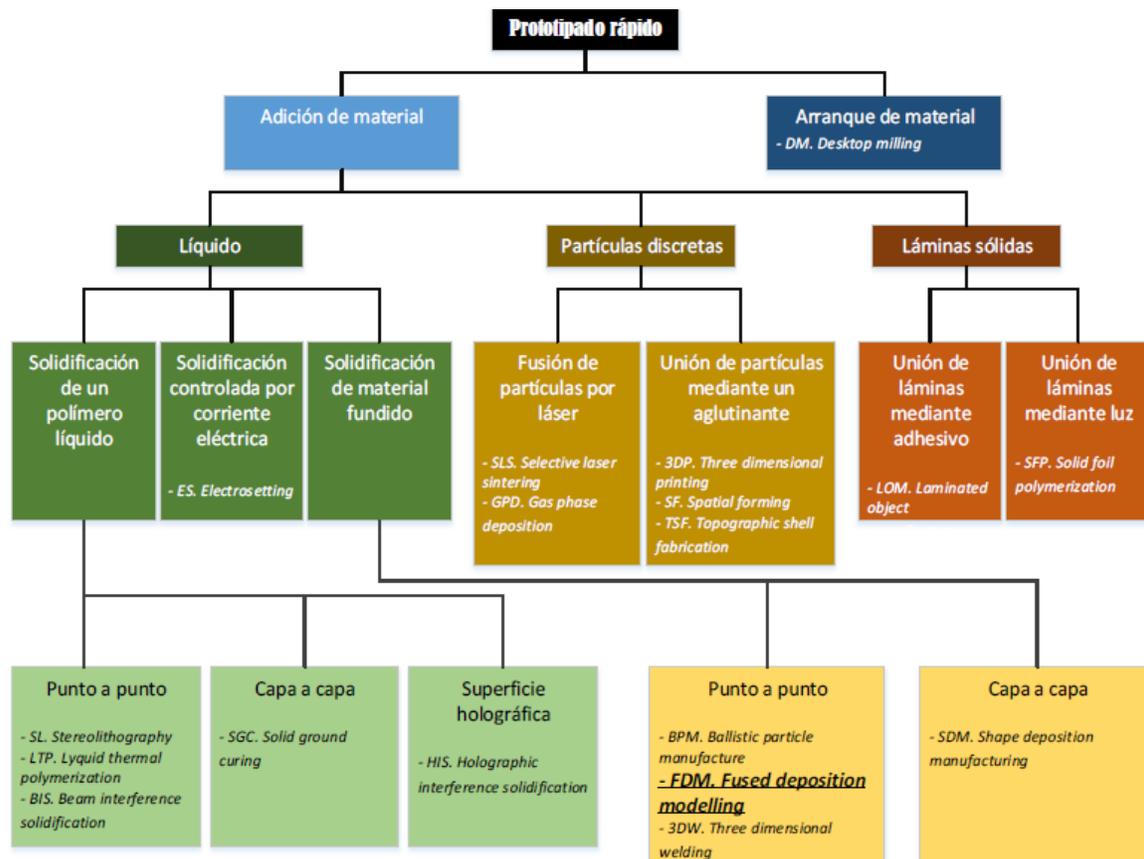


Figura 5. Clasificación Prototipado rápidos [13]

2.2.1 Producción de prototipos virtuales

Los procesos virtuales utilizan tecnologías de visualización por computadora. La producción de

prototipos virtuales es una forma de fabricar prototipos sólo mediante programas de cómputo (software); utiliza gráficas avanzadas y ambientes de realidad virtual que permiten a los diseñadores examinar una parte. Esta tecnología se usa en los paquetes comunes y convencionales de CAD para reproducir una parte, de manera que el diseñador pueda observarla y evaluarla conforme se dibuja[9].

2.2.2 Procesos sustractivos

Los procesos sustractivos como su nombre lo indican (arranque de material) comprenden la eliminación paulatina de material de una pieza de trabajo hasta alcanzar el resultado final. Este método exige operadores capacitados que remuevan material por medio de las operaciones de maquinado y acabado, una por una, hasta concluir el prototipo [9]. Para acelerar esta labor, los procesos sustractivos emplean cada vez más tecnologías asistidas por computadora, paquetes de dibujo, programas (software) de manufactura y maquinaria de control numérico, con las capacidades necesarias para producir las partes [9].

2.2.3 Procesos aditivos

Los procesos aditivos, agrega material en forma progresiva hasta producir la parte. Todas las operaciones de producción de prototipos rápidos aditivos forman las piezas en capas, consisten en estereolitografía, modelado por deposición de material fundido, manufactura de partículas balísticas, impresión tridimensional, sinterización láser selectiva y manufactura de objetos laminados. Todas las operaciones aditivas requieren software sofisticado [9].

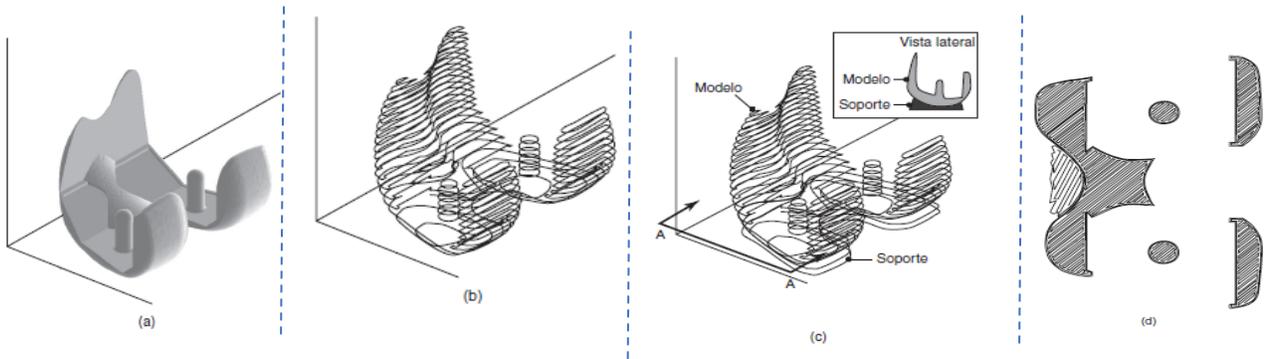


Figura 6. Pasos computacionales en la producción de un archivo de estereolitografía. (a) Descripción tridimensional de la pieza. (b) La pieza se divide en rebanadas (sólo se muestra una de 10). (c) Se planea el material de soporte. (d) Se determina un conjunto de direcciones de herramientas para manufacturar cada rebanada. También se muestra la trayectoria del extrusor en la sección A-A a partir de (c) para una operación de modelado por deposición de material fundido[9]

Obsérvese la parte sólida es mostrada en la Figura 6a. El primer paso es obtener una descripción del archivo CAD de la pieza. Segundo paso, la computadora construye rebanadas de la parte tridimensional (fig. 6b). Cada rebanada se analiza por separado y se compila una serie de instrucciones, a fin de proporcionar a la máquina de producción de prototipos rápidos información detallada sobre la manufactura de la parte. La figura 6d muestra las trayectorias del extrusor en una rebanada [9].

Casi todos los materiales se pueden utilizar en una o más operaciones de producción de prototipos, los polímeros son el material más usado hoy en día, seguidos de los cerámicos y los metales. A pesar de ello, constantemente se introducen nuevos procesos, con lo que se mejoran las técnicas y materiales existentes [11]. Para distinguir diferentes gamas o tipos de impresoras 3D, se hace principalmente en función a la tecnología que usan para llevar a cabo la impresión, a continuación, se mencionan algunas.

⌘ Estereolitografía (Estereolithography, SLA). Es un procedimiento en el cual se solidifica una resina fotocurable (resinas epoxi y resinas acrílicas) en estado líquido mediante la acción de un láser ultravioleta, el cual dibuja una sección transversal sobre la superficie del tanque de resina, solidificando así la primera capa. Posteriormente, el elevador baja el espesor indicado por la sección especificada y se repite el proceso capa a capa[14].

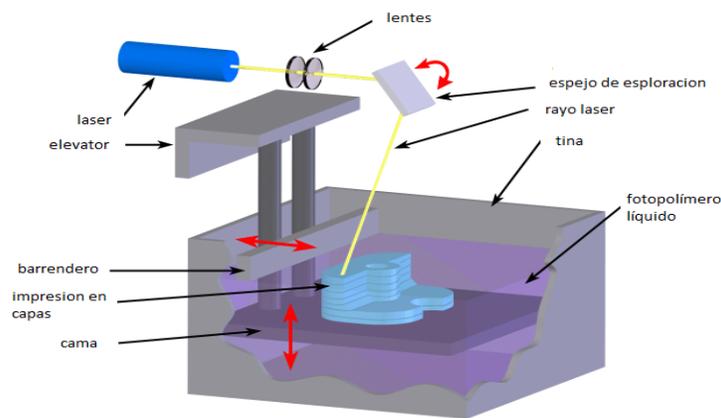


Figura 7. Esquema de Estereolitografía [14]

⌘ Sinterización selectiva por láser (*Selective laser sintering*, SLS). Es un procedimiento prácticamente similar al anterior, pero con diferencias en cuanto al tipo de material utilizado. En este caso se utiliza un material en polvo, en lugar de utilizar líquido. El láser dibuja selectivamente una sección transversal del objeto sobre la capa de polvo, haciendo que la primera capa se sinteriza, creando una masa sólida [14].

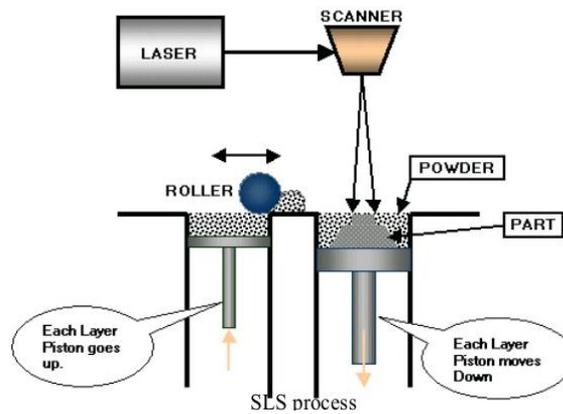


Figura 8. Esquema de Sinterización selectiva por láser [14]

⌘ Fabricación por corte y laminado (Laminater objeto manufacturing, LOM). Esta técnica se basada en la superposición y pegado sucesivo de láminas de papel cortadas por láser. Dicho laser corta los contornos de la pieza sobre un papel, de 0.1 mm de espesor, que se corresponde con la altura de capa. Los sectores de papel sobrante son cortados en cuadrículas para facilitar su remoción. A continuación, los rodillos depositan una nueva capa de papel y se repite el proceso hasta terminar todas las capas [14].

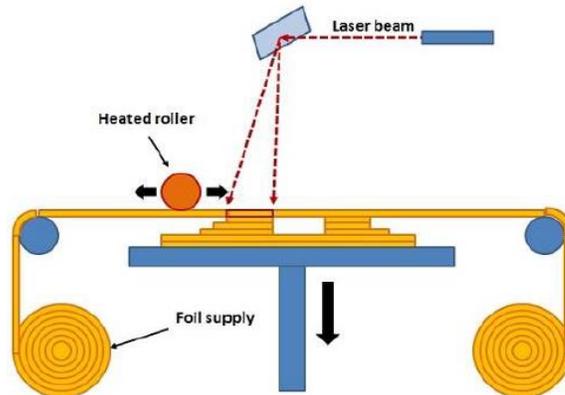


Figura 9. Esquema de Fabricación por corte y laminado[14]

⌘ Modelado por deposición fundida (Fused Deposition modeling, FDM). Es un método de manufactura aditiva que consiste principalmente en el depósito capa a capa de material fundido sobre una superficie completamente plana el cual se mantiene en constante movimiento[14]. Cuenta con un sistema de arrastre, que permite al material ingresar con un flujo continuo de tal manera que no sea interrumpido. En la figura 10, se puede observar el proceso esquemático, el material o filamento utilizado viene en una presentación en forma de rollos, es introducido en un extrusor, donde es fundido. Dependiendo del modelo de la impresora, el cabezal extrusor puede generar tres movimientos “x”, “y”, “z” o puede ser alternado, pues el movimiento en el eje “y” es generado por la base calefactora donde se deposita el material y los ejes “x”, “z” los da el cabezal extrusor, por lo general los movimientos de “x”, “y”, “z” son generados por medio de motores de paso o servos motores[15].

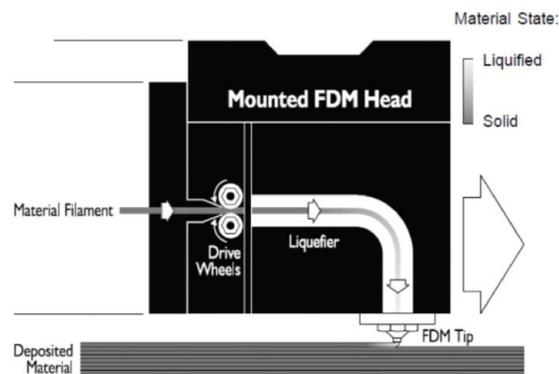


Figura 10. Proceso de modelado por deposición fundida (esquemático)[13]

2.3 Introducción del Modelado por deposición fundida FDM- Impresión 3D

El proyecto RepRap comienza en el año 2005 de las manos del británico Adrián Bowyer, con la finalidad de la creación de una impresora 3D open source, que tenga la opción de autor replicarse, es decir que pudiera imprimirse a ella misma para fabricar otra impresora con las mismas o mejores prestaciones que la original. La primera impresora construida en el año 2007, fue la Darwin Figura 11. Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin [15], fue la primera máquina de prototipado rápido, tiene una forma de cubo cuyas dimensiones son 500 mm por cada lado aproximadamente, a esta impresora le sigue la Mendel fabricada en octubre del 2009 y luego por la Prusa Mendel y Huxley en 2010, siendo las últimas los modelos de impresoras con mayor presencia en el mercado. El proyecto RepRap ocupa una tecnología de fabricación denominada FFF, la cual es el equivalente de la tecnología FDM, esto con el objetivo proporcionar una frase sin limitaciones legales para su uso, puesto que la abreviatura FDM es propiedad de Stratasys Inc[17].

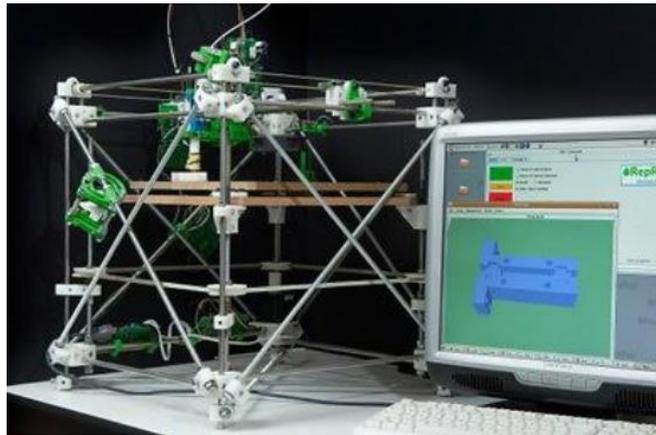


Figura 11. Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin [15]

La principal ventaja de esta tecnología es que ha permitido poner a la impresión 3D al alcance de cualquier persona, debido a que la máquina no necesita un gran espacio físico y requiere una baja potencia, por lo que su instalación puede ser realizada en ambientes no industriales. Las piezas obtenidas mediante este proceso pueden resistir calor, químicos, entornos húmedos y tensión mecánica, sin embargo, se debe acotar que la impresión de un objeto puede durar varias horas, dependiendo del tamaño, complejidad del modelo, tipo de maquinaria y el número de piezas a fabricarse simultáneamente[15].

2.3.1 Aplicaciones de la impresión 3D.

En las últimas décadas, esta tecnología ha florecido en varios sectores industriales como el aeroespacial, civil, biomédico, alimentario y otros. En general la impresión 3D se usa en diferentes áreas como prototipado, arquitectura, educación o entretenimiento, alimentación, arte, moda y por último salud, donde se está consiguiendo imprimir tejidos, prótesis e incluso órganos, este puede ser uno de los grandes avances en el mundo de la medicina[16].

2.4 Filamentos para impresión 3D tecnología FDM

Las impresoras 3D que están disponibles en el mercado utilizan básicamente materiales termoplásticos. Los materiales termoplásticos por excelencia empleados en impresión 3D son el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poliláctico). Aunque no son los más utilizados, en las impresoras 3D las cuales a su vez también utilizan ftopolímeros por las cualidades de los mismos y otro tipo de materiales, en función del objetivo que se quiera conseguir. Los materiales termoplásticos tienen la propiedad de poder fundirse, ser moldeables si se les aplica cierto calor y solidificarse cuando se enfrían. Este tipo de materiales se pueden reblandecer muchas veces y por lo tanto se pueden reutilizar. Hay que tener en cuenta que no todos los termoplásticos sirven para imprimir en 3D. Para que un termoplástico o cualquier material pueda servir para realizar impresiones en 3D debe cumplir con los test de extrusión sobre calidad de filamentos, los test de segunda extrusión cuando se imprime y las pruebas del material solidificado una vez impreso.

La extrusora es la responsable de fabricar los filamentos usados en las impresoras 3D. Permite dar la forma de tiras cilíndricas largas, agrupadas en rollos de filamento, por lo general de 1,75 mm a 3 mm de diámetro, de diferentes colores, largos y especificaciones técnicas de acuerdo al tipo de material. A continuación, se nombra algunos materiales usados para impresión 3D por modelado por deposición fundida.

2.4.1 Ácido Poliláctico (PLA)

El poli (ácido láctico) o la polilactida (PLA) es el poliéster alifático biodegradable y renovable, puede elaborarse mediante la fermentación de azúcares obtenidos de recursos renovables como la caña de azúcar, remolacha o el almidón de maíz [5]. El PLA tiene un potencial probado ya sea para reemplazar los polímeros convencionales basados en petroquímicos, para aplicaciones industriales o como un biomaterial líder para numerosas aplicaciones en medicina, como polímero bioabsorbible. El PLA es un polímero termoplástico, de alta resistencia y alto módulo. Es fácilmente procesable en equipos de plástico estándar para producir piezas moldeadas, películas o fibras. Desde el comienzo de su comercialización en 2002, los investigadores han estado tratando de explorar sus aplicaciones potenciales, como los andamios de ingeniería de tejidos en el campo médico etc [13].

2.4.2 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un material amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y cuenta con buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más usados por la tecnología de manufactura aditiva FDM. Es considerado un plástico de ingeniería, porque su elaboración y procesamiento es algo más complejo que en los plásticos comunes [17].

2.4.3 Alcohol Polivinilo (PVA)

Es un polímero plástico que se disuelve fácilmente en agua caliente y deja la superficie del objeto lista para realizar una fácil retirada del soporte. Su uso se destina en crear estructuras de apoyo para objetos en PLA y ABS [17].

2.4.4 Tereftalato de polietileno (PET)

Destaca en el empleo para botellas y otros envases. Su principal ventaja es la transparencia, además de ser resistente a los impactos y bastante fuerte. Las temperaturas de fusión son similares a las del PLA. No es un material flexible, sin embargo, no se deforma cuando se enfría[17].

2.4.5 Policarbonato (PC)

Es un material plástico de gran resistencia y durabilidad. Se usa para fabricar CD y DVD. Las pruebas para impresión de bajo coste con este material comenzaron en 2012, y no es fácil de encontrar, porque los fabricantes de este filamento son escasos todavía y resulta caro. Las temperaturas de fusión son altas, oscilando entre los 270 °C y los 300 °C. La superficie de impresión debe estar entre 90° -105° C y es recomendable el uso de laca para favorecer la adhesión[17].

2.4.6 Co-Poliéster Termoplástico De carácter flexible (TCP FLEX)

Su mayor ventaja está en la fuerza estructural y en su memoria flexible. Básicamente imprime piezas que vuelven a su forma original a pesar de que se arruguen, doblen, etc. Su resistencia térmica, química es excelente y resulta bastante fácil imprimir con él[17].

2.5 Proceso de impresión 3D con tecnología FDM

Para el proceso de impresión es necesario cumplir ciertos pasos para llegar a tener un producto impreso similar al diseñado en el software 3D, para ello en la **Figura 12** se muestra los pasos esenciales a cumplir dentro de una impresión. La descripción del proceso de la impresión 3D en primera instancia se basa en planos virtuales de las piezas a imprimir, utilizando el diseño asistido por ordenador (CAD). Los datos estándar de interfaz (extensión del archivo) entre el software CAD y la máquina de impresión, es un archivo de extensión STL.



Figura 12. Proceso de impresión [17]

Un archivo STL es un formato de malla triangular que ayudan a mejorar la calidad superficial del diseño 3D. Dicho archivo cuando se trata de impresoras low cost, es recuperado por medio de software de código abierto (*open source*), en el cual se realiza la división del modelo en capas. Dependiendo de los parámetros deseados se determina las trayectorias a base de código G (ISO), para proceder con el modelado, donde el filamento será adicionado capa por capa [16].

Durante la impresión, la boquilla extrudirá algunas capas más finas de plástico, que serán el material de soporte, es decir ayudarán durante la impresión para que la pieza se mantenga. El material de soporte se necesita cuando se imprimen piezas diseñadas para ser colgadas, o que sobresalen del objeto. La pieza después de ser impresa necesita enfriarse para mantener su forma.

2.6 Parámetros para proceso de impresión 3D

Cada tipo de filamento requiere de unas temperaturas de impresión diferentes, así como de una adherencia adecuada a la base de impresión. Estos son algunos de los parámetros de impresión que un usuario de una impresora FDM debe fijar antes de mandar imprimir alguna pieza. Asimismo, cuando se trata de una impresora open-source, el constructor de la misma debe cuidarse de otorgar a la máquina el control y precisión adecuada para que estos parámetros se puedan fijar con una estabilidad aceptable durante todo el tiempo de impresión. Los parámetros de impresión están fuertemente ligados a las propiedades finales de la pieza impresa y determinarán propiedades como su resistencia mecánica, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza. El tiempo de impresión puede variar mucho y depende de factores tales como el relleno del objeto, su tamaño o su complejidad.[13].

2.6.1 Velocidad de impresión

La velocidad de impresión es la velocidad a la cual se mueve la boquilla de extrusión mientras deposita el filamento durante el moldeo de la pieza. Conceptualmente, equivale a la velocidad de avance en una operación de fresado. Lo más evidente que se puede relacionar con este parámetro es el tiempo total en el que se fabricará la pieza, que, a su vez, depende de algunos otros parámetros. La velocidad de impresión también determina el tiempo que tiene la última capa para solidificar. Una velocidad de impresión baja dará más tiempo a la última capa impresa, antes de que se deposite sobre la misma la consecutiva[13].

2.6.2 Temperatura de la base de impresión.

El plástico semifundido se deposita sobre una base lisa y pulida (cristal) donde se va moldeando la pieza deseada. Esta base debe estar recubierta de un material que sirva de adherente para que la pieza no se desprenda durante la impresión. Como adherente se usan lacas, disoluciones de agua, cola blanca o disoluciones de agua y silicona líquida transparente. Mantener la base caliente durante la impresión es conveniente para prevenir el denominado warping, esta se puede calentar mediante resistencias eléctricas[13]. El warping (pandeo en español) es un fenómeno que consiste en el despegue espontáneo de la pieza durante el proceso de impresión, provocando que el cabezal de la máquina no pueda depositar las capas sucesivas de material en el lugar correcto.

2.6.3 Temperatura del extrusor

La temperatura del extrusor tiene que ser la adecuada para el filamento empleado. Una temperatura de impresión demasiado baja provocará que el plástico no fluya adecuadamente y se producirán atascos en el extrusor. Una temperatura muy alta puede provocar que el plástico se degrade y pierda propiedades tanto estructurales o funcionales como estéticas, pudiéndose producir un oscurecimiento del color, realizándose la impresión de manera no satisfactoria[13].

2.6.4 Relleno

El relleno se realiza a partir de un entramado que tiene un patrón. Un mismo porcentaje de relleno puede aplicarse a distintos patrones de entramado, los cuales tendrán distinto nivel de solidez en función de su forma. El entramado es, entonces, una trama con un patrón predefinido que conforma el relleno de la pieza. En la figura 13a se puede observar diferentes formas de configuración de patrón y en la figura 13b los porcentajes de densidad variando del 0 al 100% de relleno[13].

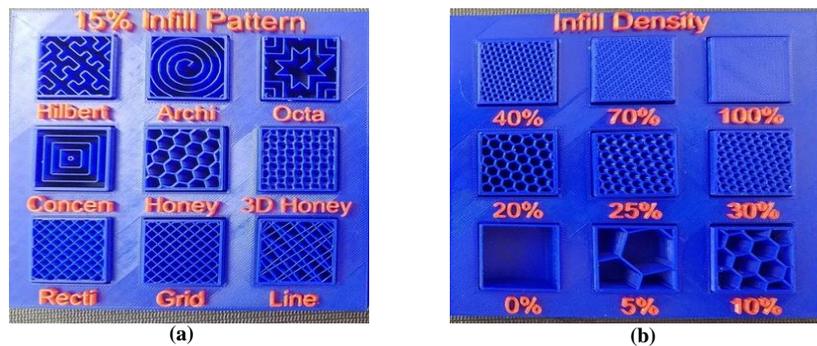


Figura 13. Relleno (a) Tipos de patrón, (b) Porcentaje de relleno[13]

ℵ Patrón de relleno. El patrón de relleno es el parámetro que define la estructura interna que deberá tener la pieza impresa en todas sus capas exceptuando la superior e inferior. Se puede elegir entre varias alternativas como pueden ser de tipo rectilíneos, panel de abeja, concéntrico, triangular etc, su elección será clave, ya que la forma de cada uno y la densidad de relleno influirán en la resistencia mecánica del objeto impreso. [18].

ℵ Densidad de relleno. Es la cantidad de material situado en estructura impresa, es decir no considera la porción de vacío. La densidad de relleno se expresa en formato decimal, 0.1 para un 10% de relleno, 0.9 para un 90%. Es posible configurar el relleno al 0% (0), para realizar piezas huecas o modelos vacíos y también al 100% (1) para obtener piezas totalmente rellenas. A mayor porcentaje de relleno, mayor será la cantidad de material, por ende, mayor el tiempo de impresión [18].

2.6.5 Número de perímetros

El método de impresión que se sigue al crear una nueva capa es, primero definir los perímetros de la pieza, y después aplicar el relleno. El número de perímetros es un parámetro que se puede definir y del que dependerá la robustez y superficie de la pieza.

2.6.6 Altura de capa

Se puede definir la altura de capa como la distancia que sube el eje Z (donde está situado el extrusor) entre capa y capa. La altura de capa determina la separación existente entre las mismas y, por lo tanto, la compresión física que existe entre ellas. La altura de capa está muy relacionada a la apariencia superficial que presentan las piezas, sobre todo si se tratan de piezas curvas o con una geometría intrincada. Como se puede observar en la Figura 14, se demuestra la influencia del espesor de capa[13]. Hay que tener en cuenta que este parámetro debe estar relacionado con el diámetro de nuestra boquilla, si la altura de capa es menor que el 50%-60% del diámetro de la boquilla, la calidad de la pieza podría verse afectada[17].

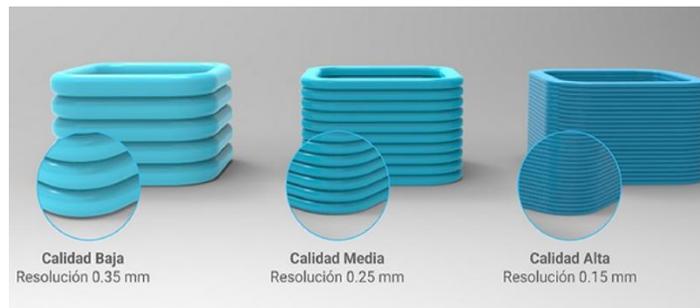


Figura 14. Influencia del espesor de capa en el acabado superficial[17]

2.6.7 Ángulo de impresión.

La predicción precisa del ángulo de impresión, es un parámetro importante en el diseño estructural porque conduce al equilibrio entre la seguridad y el peso de las estructuras. Según [18], teniendo en cuenta el ángulo de la trama, la orientación de 0° (a lo largo de la dirección de carga) garantiza la mayor resistencia a la tracción y el módulo, mientras que la orientación de 90° (transversal a la dirección de carga) da los valores más bajos respecto a propiedades mecánicas[18].

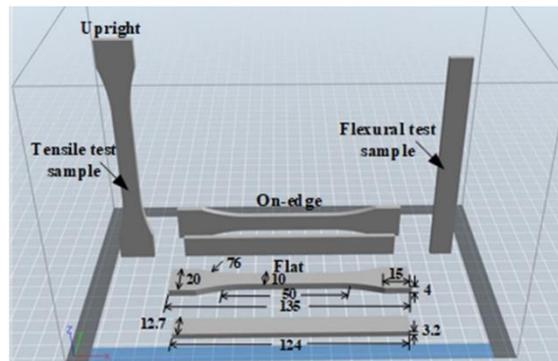


Figura 15. Esquemática de la impresión 3D ejemplares planos, en el borde y vertical [19]

La Figura 16 se visualiza la deposición de materiales para las muestras a, b y c en el software Simplify3D. Se puede ver un ángulo de trama de 0° para la muestra a, un ángulo de 90° para la muestra b y un ángulo de 45° para la muestra c.

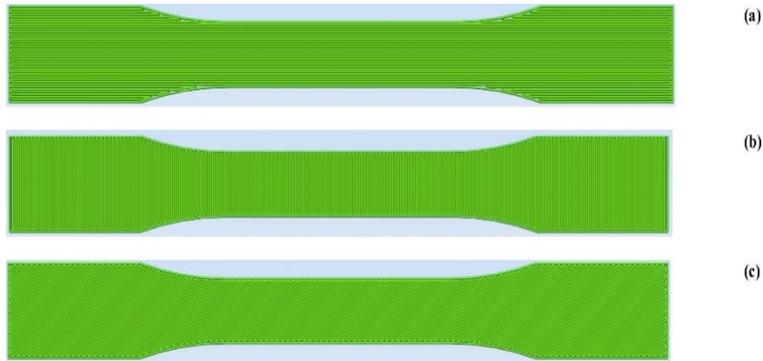


Figura 16. Ángulos de deposición[18]

2.6.8 Diámetro de la boquilla

El diámetro de la boquilla o nozzle, establece el diámetro del material de deposición semifundido. Boquillas más gruesas darán como resultado menores tiempo de impresión y menos resolución superficial, y viceversa. El diámetro más extendido actualmente en las impresoras RepRap es de 0.4 mm, que proporciona un compromiso entre velocidad de impresión y acabado [14].

2.6.9 Uso de ventilador de capa

El ventilador de capa se coloca sobre el carro de extrusión de la máquina. Suele estar acoplado a una tobera que incrementa la velocidad y orienta el flujo de aire hacia la zona que rodea el orificio de salida del plástico semifundido, esto es, la última capa de material depositado. Esto ayuda a que la última capa de material solidifique más rápido [14].

2.7 Comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante tecnología FDM

Es habitual encontrar indicaciones por parte de fabricantes o usuarios experimentados sobre como configurar una impresión para obtener piezas con un buen acabado optimizando los tiempos de impresión. Pero en muchas aplicaciones las piezas obtenidas serán sometidas a cargas estáticas o dinámicas, ya que cada vez más existe un interés mayor en fabricar piezas finales mediante esta tecnología, no solo prototipos. Es entonces cuando es necesario conocer cómo se comportan las piezas y como varían sus propiedades mecánicas según los parámetros introducidos en una impresión.

Debido a que la fabricación viene marcada por la dirección que seguirá el extrusor y el apilado de capas, el cual dependerá de la orientación definida previamente; el comportamiento que se obtendrá al fabricar una pieza mediante FDM será de carácter anisotrópico. Esto significa que la orientación y la dirección de impresión serán el punto clave para la optimización del comportamiento mecánico. En la unión del filamento se diferencia dos tipos: la unión entre hilos de una misma capa y la unión de los hilos entre capas. Las uniones dependen de la energía térmica de los hilos y de la unión de las cadenas poliméricas

de cada uno de los hilos. Por este motivo los hilos de una misma capa tendrán una unión más fuerte con respecto a las uniones de los hilos de diferentes capas[20].

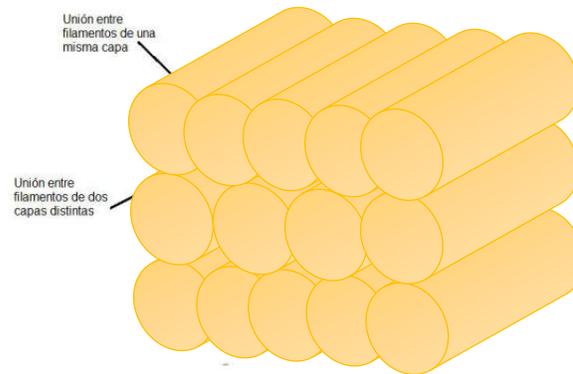


Figura 17. Representación de las uniones entre hilos en una pieza fabricada mediante FDM[20]

La dirección de fabricación será el parámetro más influyente. Por lo explicado anteriormente, la dirección de fabricación más adecuada será la que tiene las uniones entre capas de modo paralela a la dirección de la fuerza aplicada. Además, si los hilos están alineados con la dirección de la fuerza, éstos actúan como fibras de refuerzo y la pieza será más resistente. Este sería el caso de un esfuerzo a tracción, pero cuando se somete la pieza a compresión el comportamiento es inverso. Los hilos tienden a pandear, por lo que la mejor dirección es la que tiene el apilamiento de capas perpendicular a la dirección de la fuerza en caso de ser un ensayo de compresión[20].

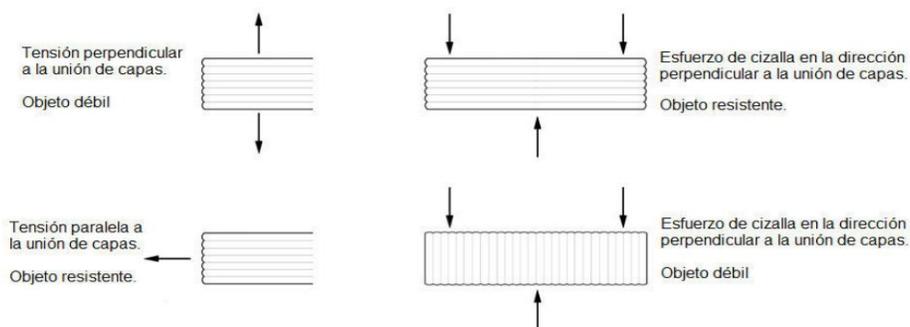


Figura 18. Esquema gráfico de los esfuerzos y el comportamiento de la pieza[20]

2.8 Antecedentes de fabricación en impresión 3D de materiales compuestos

El modelado por deposición fundida (FDM) ha ganado mucha atención en los últimos años, ya que revoluciona la fabricación rápida de componentes compuestos personalizados basados en polímeros. Para facilitar las aplicaciones de ingeniería de estos componentes impresos con FDM, es necesario comprender sus comportamientos mecánicos básicos[19]. El comportamiento mecánico es a menudo un aspecto crítico en el uso de una pieza impresa. Sin embargo, las propiedades mecánicas dependen de los parámetros del proceso y los patrones de llenado. Por lo tanto, ha habido un interés significativo en

estudiar el efecto de los parámetros del proceso y los patrones[21]. En este subcapítulo, se presenta diversos estudios de caso para abordar la necesidad de analizar los comportamientos mecánicos y demás aspectos fundamentales en el proceso FDM.

Filamentos compuestos ULTEM™ 1010 multifuncionales para la fabricación aditiva usando Fusion Filament Fabrication (FFF) (Autores: Hao Wu Michael Sulkis James Driver Amado Saade-Castillo Adam Thompson Joseph H. Koo). Este artículo investiga el desarrollo de un nuevo material compuesto de polímero de alta temperatura modificando la polieterimida (PEI) ULTEM™ 1010 con la adición de aditivos funcionales y procesándolos en filamentos para la fabricación de filamentos fundidos (FFF). Mediante extrusión de doble tornillo, se obtuvieron cuatro formulaciones diferentes utilizando combinaciones de microesferas de vidrio huecas, nanoarcilla y aditivos ignífugos no halogenados. Estos aditivos fueron diseñados para crear un material que exhibe baja densidad, alto rendimiento de carbón y baja inflamabilidad. El hecho de que la mayoría de los polímeros utilizados en FFF sean inflamables representa una amenaza cuando las piezas impresas están sujetas a un entorno hostil. La baja inflamabilidad y el ahorro de peso son propiedades deseadas para muchas aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz. Los resultados de caracterización térmica y de inflamabilidad indicaron que la formulación que consiste en 10% en peso de burbujas de vidrio, 5% en peso de nanoarcilla y 10% en peso de aditivos ignífugos exhibió el mejor rendimiento de carbón con 62.2% y la capacidad de liberación de calor más baja (HRC) de 119 J / g -1 K-1, una mejora del 10,7% en el rendimiento del carbón y una reducción del 52% en la HRC en comparación con el polímero puro[22].

El impacto de los defectos en las propiedades de tracción de las piezas impresas en 3D fabricadas por la fabricación de filamentos fusionados (Autores: Kazem Fayazbakhsh Mobina Movahedi Jordan Kalman). En este trabajo de investigación, se realizó una investigación experimental de piezas de PLA impresas en 3D FFF según ASTM D638-14. Se han obtenido resistencia a la tracción, módulo y deformación por falla para muestras con y sin defectos y se han capturado imágenes SEM de las superficies de fractura. Para las muestras sin defectos, se observa que la impresión 3D FFF de PLA introduce un comportamiento anisotrópico a las muestras, donde la impresión a lo largo de la dirección de carga, mostró una resistencia a la tracción de 57.7 MPa en comparación con la impresión transversal a la dirección de carga con una resistencia a la tracción de 30.8 MPa. El apilamiento cuasi-isotrópico tiene una tensión de falla un 20% mayor en comparación con el caso en que todos los extruidos están en la dirección de carga. El apilamiento cuasi-isotrópico se selecciona como línea de base para investigar el impacto del defecto en el rendimiento mecánico de las piezas impresas en 3D FFF fuera del PLA. Se encuentra que, para el mismo porcentaje de área de defecto, un defecto transversal a la dirección de carga tiene un impacto más severo en la resistencia a la tracción, el módulo y la tensión de falla en comparación con un defecto a lo largo de la dirección de carga. En comparación con la línea de base, se observa una reducción del 20.5% en la resistencia a la tracción, 9.6% en el módulo y 11.5% en la deformación por falla[18].

Efecto de los patrones de relleno en el rendimiento mecánico de las piezas ligeras de PLA celular impresas en 3D (Autores: Christian Lubombo Michel A. Huneault). Se investigaron las propiedades de tracción y flexión de las piezas celulares impresas en 3D con cinco patrones de relleno diferentes. El efecto de la densidad de la estructura y el número de capas perimetrales se analizó a través de las leyes

de escala de los sólidos celulares. Para la carga de tracción uniaxial, la estructura de relleno cuadrada presentó como se esperaba el mejor rendimiento mecánico en términos de módulo de tracción y resistencia específicos. Por otro lado, el relleno hexagonal exhibió sorprendentemente el mejor rendimiento mecánico en términos de módulo de flexión específico y resistencia tanto en el borde como plano. Superó tanto a los rellenos cuadrados como a los triangulares, respectivamente, bajo carga plana (fuera del plano) y en flexión de borde. El uso de un mayor número de capas perimetrales aumentó tanto la rigidez como la resistencia para todas las estructuras de relleno bajo una carga de tracción en plano uniaxial y una carga de flexión plana. Esto se debió a que las cubiertas del perímetro estaban alineadas con la dirección de carga y / o transportaban la mayor parte de la carga [21].

Modificación de la calidad de la superficie y las propiedades mecánicas mediante el pulido con láser de piezas de Al / PLA fabricadas mediante modelado por deposición fundida (*Autores: Lan Chen Xinzhou Zhang*). En este estudio, se empleó tecnología de pulido láser para mejorar la calidad de la superficie de las piezas compuestas de fibra de aluminio / ácido de polilactida (Al / PLA) producidas a través de FDM. Se investigaron la rugosidad de la superficie, la morfología de la superficie, las propiedades mecánicas dinámicas y las propiedades de tracción. Con parámetros de pulido óptimos, el proceso de pulido láser eliminó los defectos formados durante el proceso de FDM. La rugosidad de la superficie se redujo del valor inicial de 5,64 μm a 0,32 μm (Ra) Los resultados del análisis mecánico dinámico (DMA) mostraron que hubo una mejora notable en el módulo de almacenamiento (E'), el módulo de pérdida (E'') y la temperatura de transición vítrea de las muestras compuestas de Al / PLA después del pulido con láser. La superficie pulida de las muestras también condujo a una mejora en la resistencia a la tracción y el módulo de Young [23].

Compuestos de polímeros reforzados con fibra impresos en 3D - Análisis estructural (*M. Mohammadzadeh aA. Imeri aI. Fidan bM. Elkelany c*). En esta investigación, se estudian las propiedades mecánicas y estructurales de los componentes de fabricación aditiva reforzada con fibra continua (CFRAM). El análisis estructural se realiza para comprender el comportamiento de falla de los componentes CFRAM. Basado en el análisis SEM de las partes probadas, se han investigado las correlaciones entre los resultados de la prueba mecánica y la microestructura de las partes. Los componentes CFRAM son materiales ligeros pero fuertes con una amplia gama de aplicaciones potenciales en la industria automotriz, aeroespacial, artículos deportivos y herramientas médicas. Las piezas producidas tienen un peso ligero en comparación con los metales, fuertes propiedades mecánicas y un tiempo de fabricación corto. Adicionalmente, El polímero termoplástico utilizado para los componentes CFRAM hace que el producto sea reciclable. En este estudio, se usaron fibra de carbono (CF), fibra de vidrio (FG) y Kevlar como agentes de refuerzo, y nylon como material base. Se observó que los principales mecanismos de falla para los componentes CFRAM son la extracción de la fibra, la rotura de la fibra y la delaminación. Además, se entendió que existe una correlación entre la densidad de apilamiento de la fibra y las propiedades mecánicas[24].

Efecto del contenido de madera en el filamento FDM sobre las propiedades de las piezas impresas en 3D (*Autores: Mirko Kariz, Milan Sernek Murco Obućina Manja Kitek Kuzman*). Se investigó el efecto del contenido de madera en los materiales de impresión 3D sobre las propiedades de las piezas impresas en 3D. Se produjeron seis filamentos que usan ácido poliláctico (PLA) con niveles de carga variables de partículas de madera del 0% al 50% en peso y se utilizaron para la impresión 3D. La densidad

de los filamentos y las piezas impresas en 3D utilizadas en este estudio disminuyeron ligeramente con el aumento del contenido de madera. La resistencia a la tracción de los filamentos aumentó de 55 MPa a 57 MPa con una adición de 10% de madera, pero disminuyó con niveles más altos de contenido de madera a 30 MPa para filamentos con 50% de contenido de madera. Con el aumento del contenido de madera, la superficie se vuelve más áspera, había más vacíos y había grupos visibles de partículas de madera. Un mayor contenido de madera en piezas impresas en 3D disminuyó el módulo de almacenamiento, medido con carga torsional en un reómetro, pero no cambió la temperatura de transición vítrea [25].

Diseño de un compuesto de memoria de forma (SMC) con tecnología de impresión 4D (Autores: *Minkyu Kang Youngjun Pyo Joon Jang Yunchan Park Yeon-Ho Son MyungChan Choi Joo wan Ha Young-Wook Chang Caroline Sunyong Lee*). En esta investigación se usó una herramienta de modelado por deposición fundida (FDM) para fabricar un compuesto con memoria de forma (SMC) que combinaba una aleación con memoria de forma (SMA) con un polímero con memoria de forma (SMP). La SMA causó un efecto de memoria de forma debido a un cambio de fase entre las fases de martensita y austenita, a su vez debido a un cambio de temperatura. Se fabricó un actuador SMC impreso en 4D utilizando SMA y SMP con una impresora 3D FDM. Cuando la corriente fluye en el cable SMA, la PYME indujo una fuerza de flexión reversible, causada por un efecto de calentamiento Joule. Cuando una corriente de 1.5 A fluye durante 2 s, se obtiene una distancia de movimiento de 7 mm con una diferencia de temperatura de 10° C. Mediante análisis DSC y DMA, se indujo SME en un rango de temperatura específico de 45-60 ° C. A bajas temperaturas, SMP y SMA coexistieron en forma de fibra, por lo que se aumentó la resistencia del SMC. Sin embargo, la fase del SMP cambió a una forma matricial a temperaturas más altas. A través de esta interacción entre el SMA y el SMP, el SMC mostró una fuerza de flexión continuamente reversible, causada por diferencias en la temperatura y la transformación de fase. [26].

Comportamiento térmico del nanocompuesto de polímero relleno de grafeno basado en PC-ABS sintetizado por el proceso FDM (Autores: *Vijay Tambrallimath R. Keshavamurthy Saravanabavan D Praveennath G. Koppad G.S. Pradeep Kumar*). La mejora de la propiedad de los polímeros podría lograrse mediante la combinación de dos o más polímeros y mediante la adición de materiales de relleno para cumplir con los requisitos de la aplicación. En la presente investigación, el policarbonato (PC) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), los dos polímeros se mezclaron y se agregaron plaquetas de grafeno como nanofiller en una proporción de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8% en peso, respectivamente. La mezcla de polímeros y las plaquetas de grafeno se mezclaron a la temperatura apropiada y se extrusieron en forma de filamento de 1,75 mm de diámetro. El filamento se utilizó como material de alimentación para el modelado de deposición fundida (FDM) para desarrollar las muestras de prueba. Los nanocompuestos desarrollados con FDM se sometieron a calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) para estudiar el efecto de las plaquetas de grafeno. La adición de plaquetas de grafeno dio como resultado un aumento significativo en el módulo de Young con el valor más alto de 4.038 GPa obtenido para nanocompuesto con un contenido de grafeno de 0.8%. El análisis térmico mostró que la adición de plaquetas de grafeno aumenta la temperatura de transición vítrea y reduce la masa con el aumento de la temperatura[27].

Reciclaje de residuos de polímeros con refuerzo de SiC / Al₂O₃ para aplicaciones de herramientas rápidas (Autores: *Narinder Singh Rupinder Singh I.P.S Ahuja*). En este trabajo de investigación se ha

hecho un esfuerzo para desarrollar un material de alimentación de filamento de alambre compuestos de residuos de polímeros reciclados como matriz de base con SiC / Al₂O₃ de refuerzo para el desarrollo sostenible. El proceso comienza con la recolección de residuos de polímero (polietileno de alta densidad (HDPE) como caso de estudio) de la industria local. Además, según las propiedades térmicas, diferentes proporciones de HDPE, SiC y Al₂O₃ se prepararon utilizando un mini mezclador (extrusora de doble tornillo) para asegurar una dispersión uniforme. Después de este extrusor de un solo tornillo se utilizó para preparar filamentos de alambre de diámetro uniforme para la configuración del modelado por deposición fundida (FDM). El alambre de filamento así preparado se probó por sus propiedades de tracción. Este estudio destaca el procedimiento detallado para gestionar los residuos de polímeros con un método novedoso mediante el uso de polímeros reciclados como herramientas rápidas. Después de reforzar los materiales, se observó un efecto insignificante en las propiedades térmicas y reológicas del material compuesto, lo que permite el uso de alambre de filamento en máquinas de impresión FDM / 3D[28].

Impresión 3D para electroanálisis: desde células electroquímicas de uso múltiple hasta sensores

(Autores: Rafael M. Cardoso Dianderson MH Mendonça Weberson P. Silva Murilo NT Silva Edson Nossol Rodrigo AB Silva Eduardo M. Richter Rodrigo AA Muñoz). Este trabajo presenta aplicaciones potenciales de impresoras 3D de modelado por deposición fundida de bajo costo para fabricar celdas electroquímicas impresas en 3D de uso múltiple para mediciones de flujo o lotes, así como la impresión 3D de plataformas de detección electroquímica. Las células electroquímicas y los sensores se imprimieron con filamentos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico dopado con grafeno (G-PLA), respectivamente. El tiempo total de operación de impresión y el costo estimado por celda fueron de 6 h y \$ 6.00, respectivamente, mientras que los sensores se imprimieron en minutos (16 tiras de sensores de 1 × 2 cm en 10 minutos a un costo de \$ 1.00 por sensor). El rendimiento celular se demuestra para la detección amperométrica de terc- butilhidroquinona, dipirona, dopamina y diclofenaco mediante análisis de inyección de flujo (FIA) y análisis de inyección por lotes (BIA) utilizando diferentes electrodos de trabajo, incluido el sensor impreso en 3D propuesto, que presentó un rendimiento electroanalítico comparable con otros carbonos- electrodos basados (LOD de 0.1 μmol L⁻¹ para dopamina)[29].

Capítulo 3

OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico del PLA reforzado con partículas metálicas, cerámicas y fibras naturales, para la fabricación de un prototipo industrial.

3.2 Objetivos Específicos

Fabricar probetas normalizadas de PLA, y sus compuestos con partículas, orientando las líneas de deposición en 3D, a cero grados con respecto a la aplicación de la fuerza.

Realizar ensayos de tracción bajo norma ASTM D638, a los materiales compuestos de matriz de PLA con diferentes refuerzos.

Analizar la morfología de los materiales en la superficie de fractura, con ayuda de microscopía electrónica de barrido.

Comparar los datos obtenidos en los ensayos destructivos y seleccionar una aplicación, por medio del software CES EduPack.

Validar el comportamiento mecánico de la aplicación con ayuda de métodos de elementos finitos en el software ANSYS.

Obtener un prototipo con el material de mejor comportamiento en la simulación.

Capítulo 4

METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El desarrollo del trabajo consistió en fijar una serie de parámetros (según datos del fabricante, investigaciones y norma) para definir un modelo de probeta. Todas las probetas poseerán unos parámetros similares de acuerdo a su tamaño, forma y relleno; esto con el fin de poder realizar una apropiada comparación. El material del cual están compuestas, es la variación de la investigación, este se modifica de acuerdo a un porcentaje de composición y tipo de material, ya establecido según el fabricante. Por tanto, una vez fijados los parámetros, se diseñan las probetas para ser fabricadas y finalmente ensayadas por los equipos y métodos de análisis determinados según los objetivos.

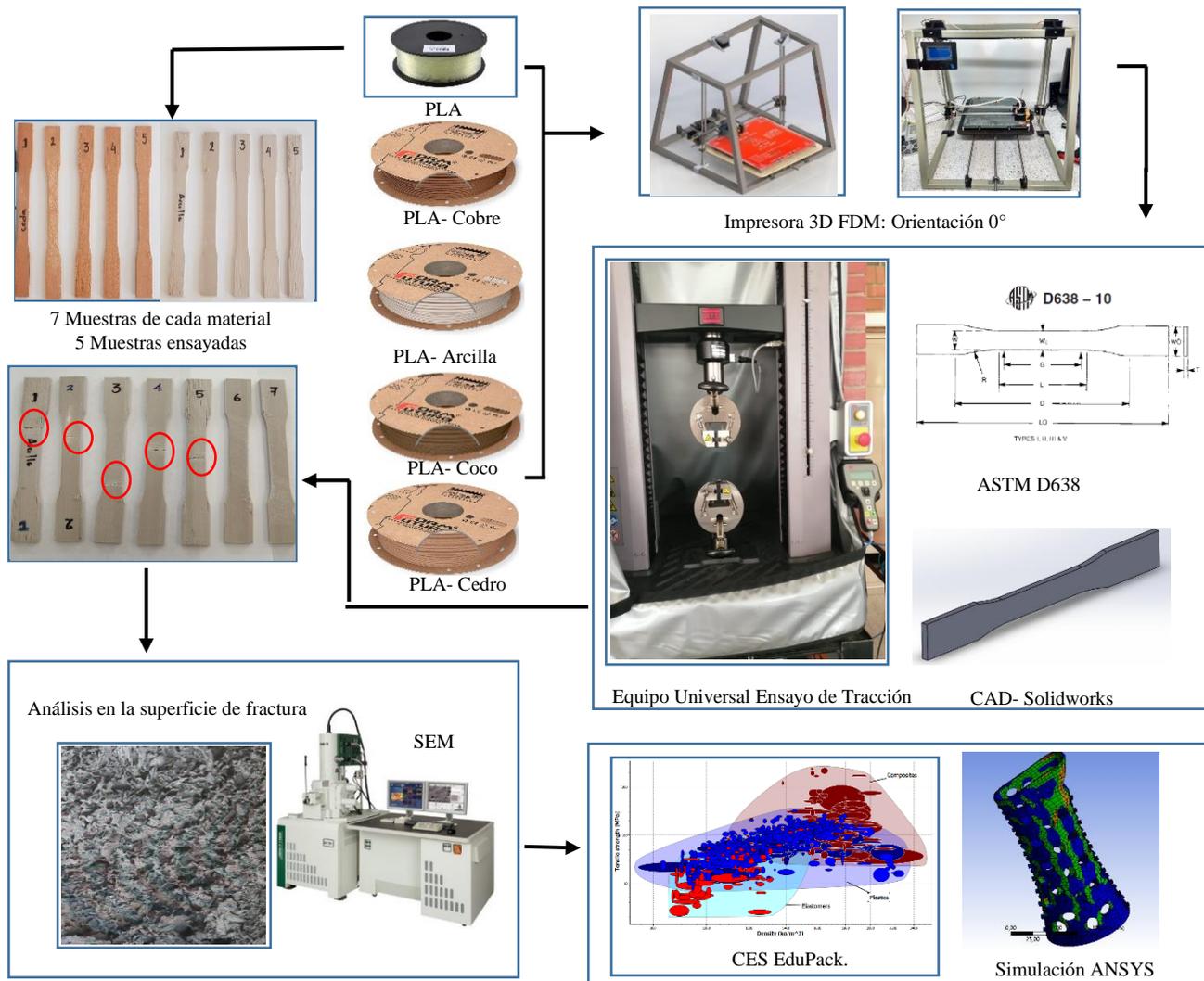


Figura 19. Metodología de investigación [Autor]

4.1 Materiales

Los materiales que se estudiaron en el presente proyecto son: PLA (ácido Poli-láctico) y PLA reforzado con diferentes polvos o partículas de cobre, cerámica y madera. En total fueron cinco materiales que se les realizó los respectivos análisis, con el propósito de comprender los comportamientos mecánicos.

Los materiales vienen en rollo en forma de filamento con un diámetro de 1,75 mm, el largor o metraje varía de acuerdo al tipo de material; el Pla fue adquirido en la empresa Bimek Ltda. en Bogotá - Colombia y los materiales compuestos con matriz PLA, fueron adquiridos en la empresa FormFutura de la ciudad de Nijmegen - Países bajos. En los Anexos 1,2,3 y 4 se presentan las fichas técnicas. La fase dispersa para los compuestos reforzados con partículas es equiaxial (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente las mismas en todas las direcciones).

4.1.1 PLA

El PLA es un material transparente en estado amorfo y a medida que va cristalizando se vuelve opaco. Requiere temperaturas superiores a 180°C-190°C para su procesamiento. En el caso de la impresión 3D, son múltiples sus ventajas. Además de un precio competitivo, permite imprimir con buena calidad (sin presencia de humedad) [17].



Figura 20. Carrete PLA [Autor]

4.1.2 MetalFil - Classic Copper

Es un filamento a base de PLA relleno de metal con aproximadamente el 80% del relleno de cobre. Este increíble alto relleno con polvos de cobre permite a todos los usuarios de impresoras 3D FDM, imprimir en 3D objetos de cobre que son casi indistinguibles de los objetos originales de cobre fundido.



Figura 21. Carrete MetalFil [FormFutura]

4.1.3 StoneFil

Es un filamento basado en PLA, con el 50% de piedra pulverizada de arcilla cerámica. Este alto "relleno de piedra" ha dado como resultado un filamento de impresora 3D con características estéticas notables y una densidad de material significativamente mayor hasta un 37% más alto que el PLA "normal".



Figura 22. Carrete StoneFil [FormFutura]

4.1.4 EasyWood

Es un filamento a base de PLA relleno de madera con aproximadamente 40% de partículas de madera triturada. EasyWood es un filamento de madera muy fácil de imprimir. En este caso se dispondrá de dos tipos de partículas de madera (coco y cedro); para lograr evaluar en caso de alguna variación en el comportamiento mecánico según el tipo de fibra.

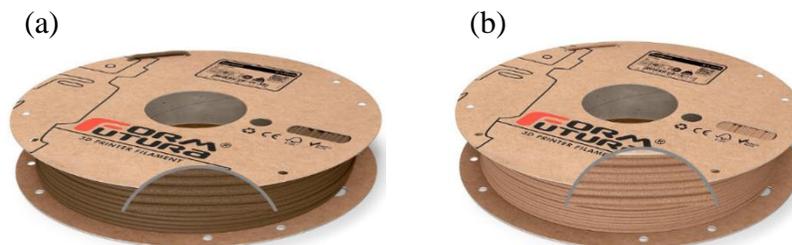


Figura 23. Carrete EasyWood (a). Coco y (b). Cedro [Fuente: FormFutura]

4.2 Propiedades de los filamentos

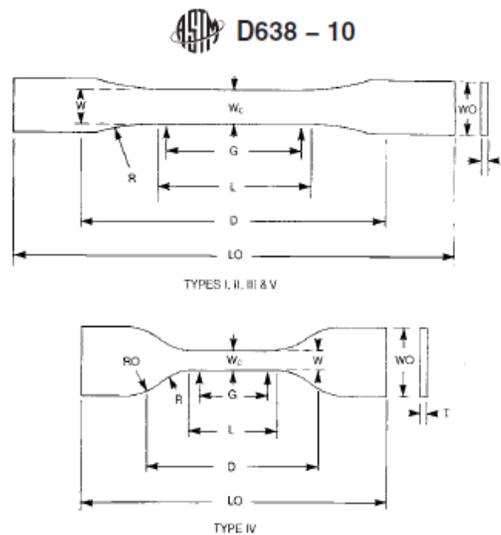
Antes de la selección de parámetros, se inició analizando con detalle los datos del fabricante, este dio un rango dentro del cual, el material tiene un mejor comportamiento, que se tuvo en cuenta al momento de realizar la impresión 3D. Como se mencionó previamente, el objetivo de la investigación no es variar parámetros, si no el de establecer unos medidas según: investigaciones ([5], [13], [30]–[34], [14]–[19], [21], [25]), fabricante (Bimek Ltda., FormFutura) y Norma ASTM D638, para de esta manera poder realizar una exhaustiva comparación y análisis de las propiedades que le aporta cada tipo de material al PLA. A continuación, en la **Tabla 1**. Datos del fabricante [Autor], se presenta las propiedades mecánicas físicas y térmicas de los filamentos investigados.

Tabla 1. Datos del fabricante [Autor]

	PLA	Metalfil (80% Cobre)	StoneFilm (50% Arcilla Cerámica)	EasyWood (40% Coco)	EasyWood (40% Cedro)
Ø Filamento	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm
Bobina	310m (1Kg)	183m (1.5Kg)	122m (0.5Kg)	173m (0.5kg)	173m (0.5kg)
Recomendaciones generales de impresión según ficha técnica					
Tamaño Boquilla	≥ 0.4 mm	≥ 0.4 mm	≥ 0.4 mm	≥ 0.4 mm	≥ 0.4 mm
Altura de la capa	≥ 0.1 mm	≥ 0.1 mm	≥ 0.15 mm	≥ 0.2 mm	≥ 0.2 mm
Caudal	+ 100%	± 104%	± 110%	± 104%	± 104%
Temperatura Impresión	± 190 a 230° C	± 190 a 220 ° C	± 190 a 240 ° C	± 200 a 240 ° C	± 200 a 240 ° C
Velocidad de impresión	media	media	alta / media	baja	baja
Retracción		Sí ± 5 mm	Sí ± 5 mm	Sí ± 5 mm	Sí ± 5 mm
Cama de calor	± 30 a 50 ° C	± 0 a 60 ° C	± 0 a 60 ° C	± 0 a 60 ° C	± 0 a 60 ° C
Velocidad ventilador	50 a 100%	50 a 100%	50 a 100%	50 a 100%	50 a 100%
Propiedades físicas					
Gravedad específica	1.24 g/cc	3.4 g/cc	1.7 g/cc	1.20 g/cc	1.20 g/cc
Índice de fluidez	6.09 g/10min	-----	94 g/10min	4.5 g/10min	4.5 g/10min
Propiedades Mecánicas					
Resistencia al impacto	5.1 KJ/m3	9.3 KJ/m3	2.9 KJ/m3	7.1 KJ/m3	7.1 KJ/m3
Resistencia a la tracción	49.5 MPa	18.3 MPa	38.0 MPa	71 MPa	71 MPa
Módulo de tracción	2346.5 MPa	4210 MPa	4760 MPa	1930 MPa	1930 MPa
Alargamiento a la rotura	5.2%	4.5%	33%	171 %	171 %
Resistencia a la flexión	103.0 MPa	-----	-----	± 59.6 MPa	± 59.6 MPa
Módulo de flexión	3150.0 MPa	-----	-----	± 2583.9 MPa	± 2583.9 MPa
Dureza	83 (shore D)	-----	-----	-----	-----
Propiedades Térmicas					
Temperatura de Fusión	145 a 160 °C	± 210 ± 10°C	± 77 a 153°C	± 145 ± 10°C	± 145 ± 10°C
La temperatura de ablandamiento de Vicat o dureza de Vicat	-----	± 66°C	± 57°C	± 46°C	± 46°C

4.3 Diseño de probeta

Previo al diseño, se realizó una investigación de la normatividad vigente en ensayos de materiales poliméricos. Sin embargo, actualmente no se cuenta con una norma relacionada a pruebas de tracción de piezas fabricadas en impresión 3D mediante FDM (modelado por deposición fundida). Es por ello, que se decidió basar el diseño de las probetas, en la norma ASTM D638 (Metodología de prueba estándar para propiedades a tracción de plásticos). Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en forma de muestras de prueba estándar con forma de mancuerna cuando se prueban en condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de prueba. Esta norma propone realizar el ensayo con varios tipos de especímenes: La Tipo I: son las preferidas para los ensayos en investigaciones, donde involucra materiales compuestos con un espesor de 0-7mm. La Tipo II: puede usarse cuando un material no se rompe en la sección estrecha de un tipo de probeta preferida. La Tipo III: Para especímenes con un espesor entre 7-14mm. La Tipo IV: se usa para comparar materiales de diferentes casos de rigidez con espesores de 0-4mm. La Tipo V: donde el espesor del espécimen sea limitado de 0-4mm y se necesiten pruebas de estabilidad térmica[35].



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Figura 24. Dimensiones de Tipos de probetas[35]

Posterior a los parámetros de dimensión, la Norma ASTM D638 aclara que el grosor, T, debe ser de 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 pulg.). Para todos los tipos de muestras moldeadas, y para otras muestras de Tipos I y II cuando sea posible. En la Tabla 2 se describen las medidas seleccionadas en relación a cada dimensión.

Tabla 2. Dimensiones del diseño de la probeta

Dimensiones	Descripción	Magnitud (mm)
W	Ancho de la sección estrecha	13
L	Longitud de la sección estrecha	57
WO	Ancho total	19
LO	Longitud total	165
G	Longitud Calibrador	50
D	Distancia entre las empuñaduras	115
R	Radio de filete	76
Wc	0,00 mm – 0.10mm	W
T	Espesor	3.5

De acuerdo a lo anterior se diseñó la probeta de prueba, para compuestos reforzados que es la Tipo I. En la Figura 25 se muestra el plano dimensional de la probeta. Se empleó el software de diseño Solidworks con licencia 2018 y se ha exportado a un formato STL, para que pueda ser leído e interpretado por el software de parametrización de impresión; en esta investigación se decidió por el software Repetier Host, aunque existe diferentes softwares o programas de impresión se consideró su facilidad y eficiencia en procesos de impresión 3D.

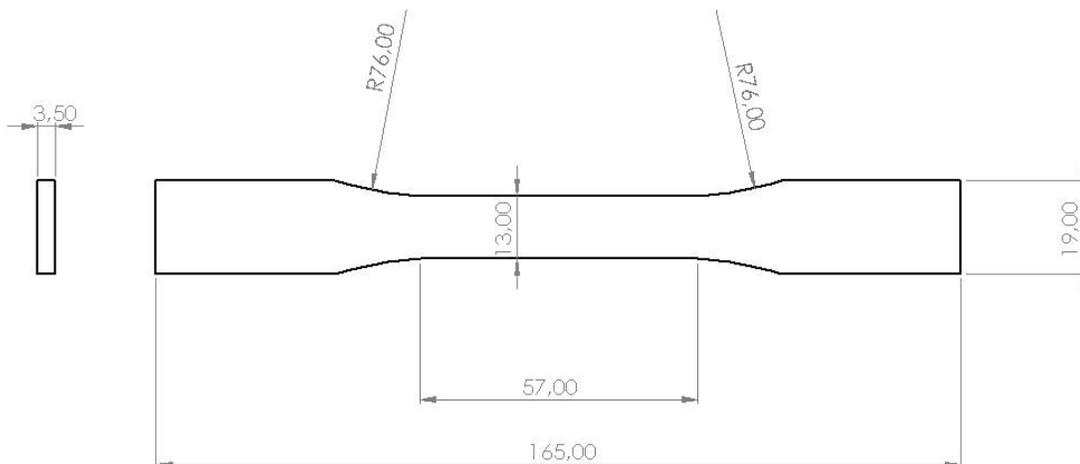


Figura 25. Diseño probeta [Autor]

A continuación, en la Figura 26 se muestra el diseño en vista isométrica tomada del software Solidworks.

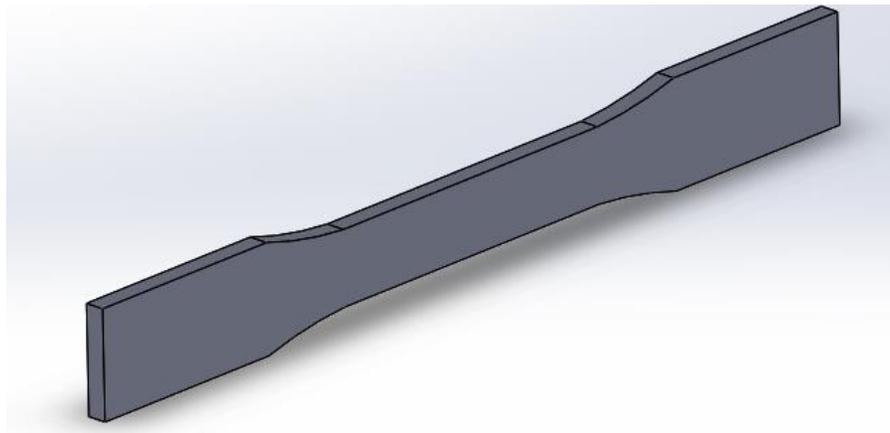


Figura 26. Diseño CAD [Autor]

El software encargado de generar el GCODE a partir del archivo STL importado en Repetier Host es Slic3r. El programa corta el modelo en rebanadas horizontales (capas), genera las trayectorias para rellenarlas y calcula la cantidad de material a extruir.

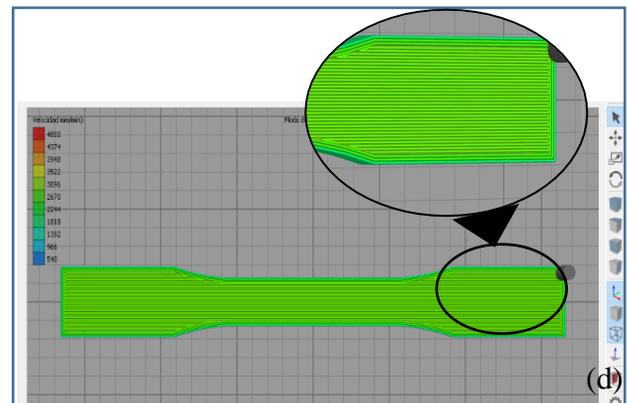
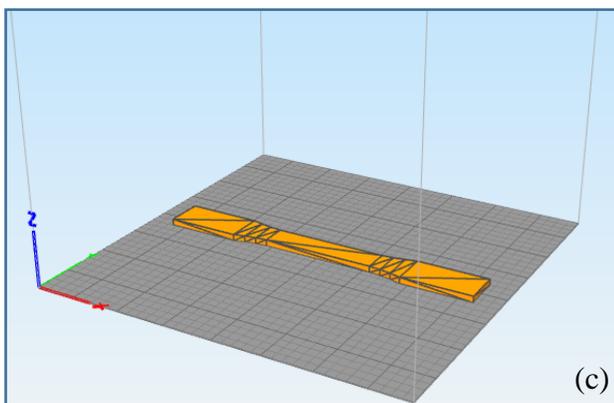
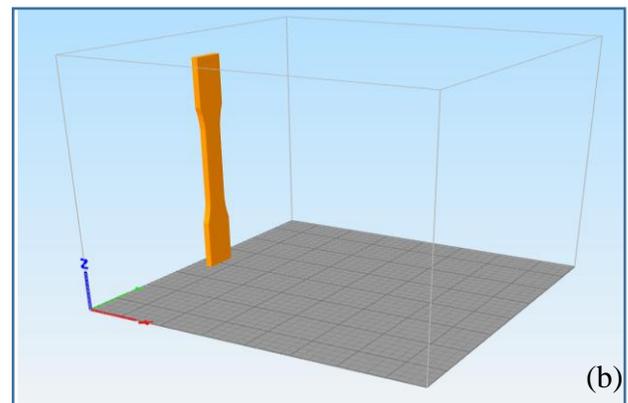
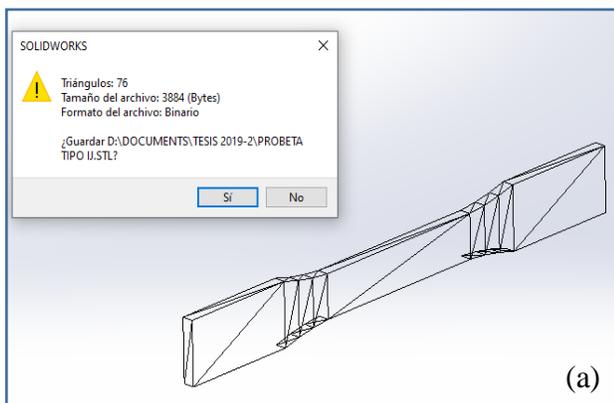


Figura 27. Probeta exportada desde Solidworks en modelo 3D formato STL a programa Repetier Host [Autor]

En la **Figura 27** se observa el procedimiento aplicado, donde una vez exportado desde Solidworks el modelo 3D en formato STL (**Figura 27a**); se emplea el programa Repetier Host, el cual importa el archivo STL y lo ubica de acuerdo a una orientación por defecto (**Figura 27b**). Dependiendo de la posición de la pieza, la orientación de sus capas cambiará, puesto que la impresora añade las capas siempre de la misma forma (de abajo hacia arriba). El programa Repetier Host cuenta con herramientas que permite hacer modificaciones de posición y rotación de la pieza, permitiendo la orientación deseada de los filamentos. Además, simula el proceso de impresión, presentando una visión clara de lo que podría ser la pieza terminada. De acuerdo a lo anterior, las probetas se situaron en posición horizontal sobre su ancho, esta posición es también nombrada posición plana (**Figura 27c**), permitiendo que los filamentos se sitúen de forma longitudinal a la carga (**Figura 27d**).

Según el marco teórico, el filamento se comporta como una fibra y las propiedades de las probetas están fuertemente ligadas a la orientación y dirección de impresión; es decir, el material impreso presenta un comportamiento anisotrópico, lo cual lo hace que sus propiedades están fuertemente ligadas a la dirección a considerar, si los hilos están alineados con la dirección de la fuerza, éstos actúan como fibras de refuerzo y la pieza será más resistente, punto clave para la optimización del comportamiento mecánico. Lo anterior fue considerado antes de iniciar la etapa de impresión.

4.3.1 Configuración de los parámetros de impresión.

Las configuraciones de la impresora se conservaron fijas para todas las muestras de materiales. El porcentaje de relleno establecido en cada probeta fue de un 100 %, con una orientación de los filamentos a 0° con relación a la aplicación de la carga.

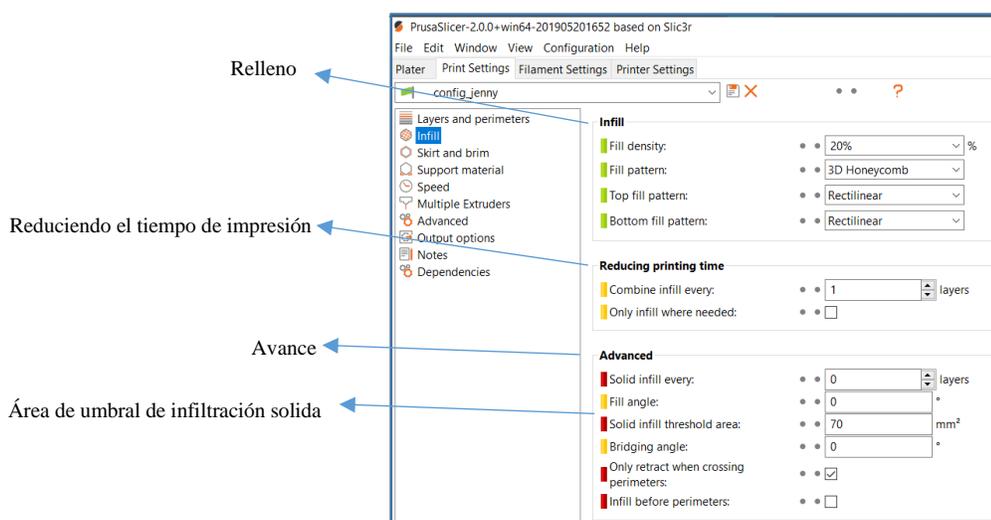


Figura 28. Configuración de relleno[Autor]

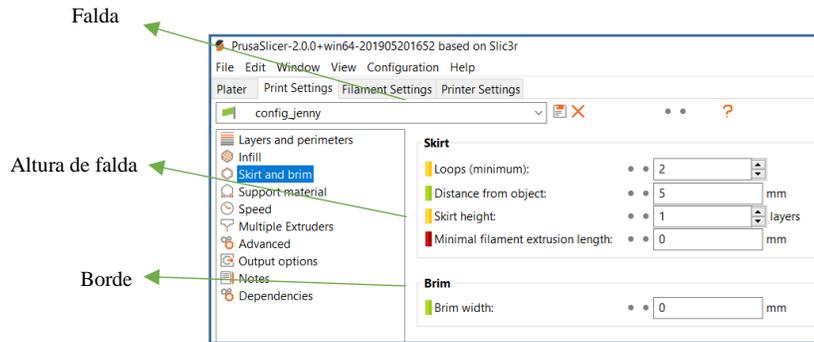


Figura 29. Configuración de falda y borde[Autor]

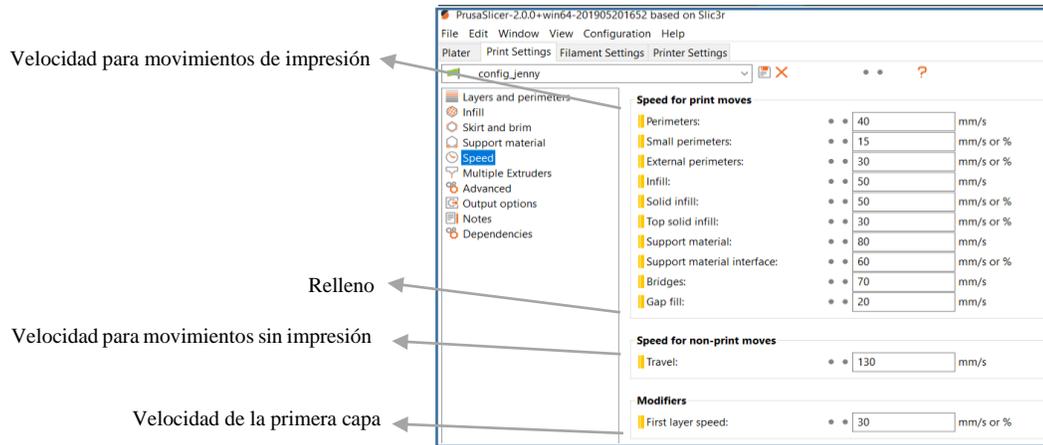


Figura 30. Configuración de velocidad[Autor]

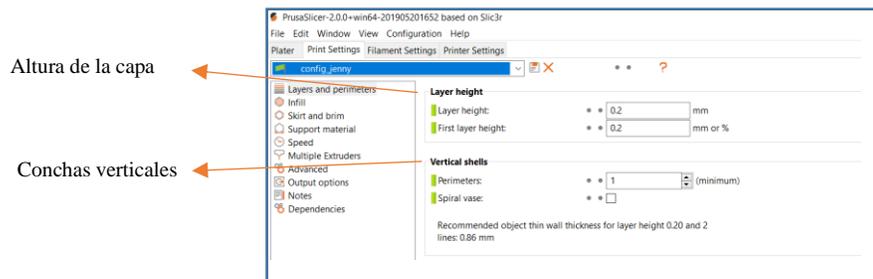


Figura 31. Configuración de capas y perímetros[Autor]

Terminada la parametrización de los niveles de cada probeta, el programa muestra el tiempo total de impresión, la cantidad de filamento que se usará en milímetros y número total de líneas, como se ve en la Figura 32 a continuación. Con esta información se puede hacer un tiempo estimado de la impresión de todas las probetas y la cantidad de material necesario.

Estadísticas de Impresión	
Tiempo Estimado Impresión:	1h:18m:35s
Número de Capas:	17
Total de Líneas:	4275
Filamento Necesario:	3837 mm
Extrusor 1	3821 mm

Figura 32. Estadísticas de impresión[ASTMD638]

4.3.2 Código G

Visualizando el archivo en bloc de notas, el G-CODE esta esquematizado de la siguiente manera. Como el código es extenso se muestra las primeras líneas y en los anexos se podrá visualizar completo.

M107	; Filament gcode
	G21 ; set units to millimeters
	G90 ; use absolute coordinates
	M82 ; use absolute distances for extrusion
T0	G92 E0
M190 S70	G1 E-5.00000 F2400.00000
M109 S200	G92 E0
G28	G1 Z0.200 F7800.000
G0 Z5	G1 X67.725 Y159.275
G0 X0 Y0	G1 E5.00000 F2400.00000
G91	G1 F1800
T0	G1 X67.725 Y140.725 E5.62790
G0 E8 F100	G1 X104.263 Y140.725 E6.86466
T1	G1 X109.898 Y142.160 E7.06148
G0 E8 F100	G1 X115.662 Y143.165 E7.25955
T2	G1 X121.489 Y143.725 E7.45769
G0 E8 F100	G1 X178.511 Y143.725 E9.38780
T0	G1 X184.338 Y143.165 E9.58594
G90	G1 X190.102 Y142.160 E9.78401
G0 X30 Z0 F1000	G1 X195.737 Y140.725 E9.98083
G0 Z0.1	
G92 E0	

Figura 33. G-CODE[Autor]

4.4 Proceso de impresión

Para la impresión de las probetas, se empleó una máquina basada en un modelo reprop impresión 3D, con un área de impresión de 31 cm x 31 cm x 35cm aproximadamente, disponible en los laboratorios de la Universidad de Pamplona.

Esta impresora usa el método de manufactura aditiva que consiste principalmente en el depósito capa a capa de material fundido sobre una superficie completamente plana. La impresora cuenta con un vidrio como soporte o base de la pieza, el cual se mantiene caliente constantemente, además se le aplica laca para mejorar la adhesión del material y evitar que se presente el warping, que es un fenómeno que consiste en el despegue espontaneo de la pieza durante el proceso de impresión.

En la Figura 34 se observa la impresora y en la Tabla 3 las especificaciones técnicas del equipo.

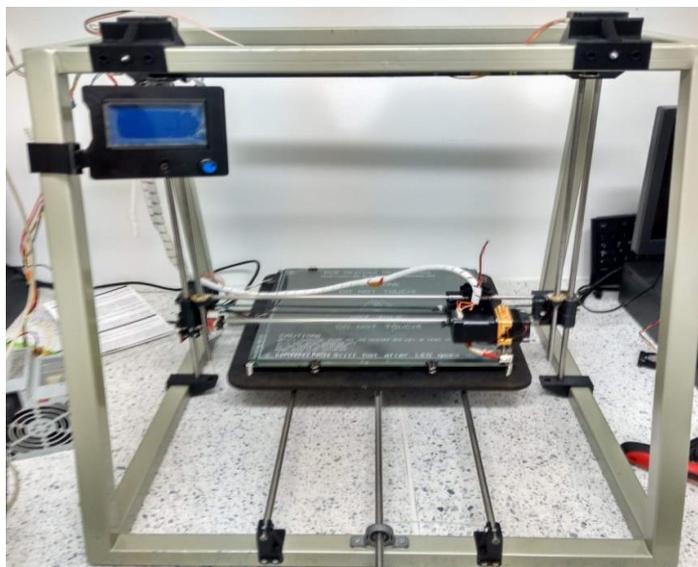


Figura 34. Impresora 3D [Autor]

Tabla 3. Especificaciones técnicas impresora[Autor]

Especificaciones técnicas impresora	
Electrónica	Arduino MEGA 2560 rev + RAMPS 1.4 Pantalla de LCD con pulsador para la navegación
Alimentación	12 V
Comunicaciones	Lector de tarjetas SD, Puerto USB tipo B
Firmware	Marlin
Extrusor	MK8
Hot-end	NO
Nozzle	0.4 mm
Materiales de impresión	PLA- PLA COMPUESTO

La norma ASTM D638 estipula que se deben de ensayar cinco probetas por serie. Sin embargo, para respaldar cada conjunto de muestras, en caso de que algún ensayo se ejecutara erróneamente, se han fabricado siete probetas por serie, en este caso por tipo de material. En total, se fabricaron cinco series, es decir treinta y cinco (35) muestras o probetas.

Durante el proceso se tomó datos de temperatura para evitar precipitaciones. Se monitoreo constantemente el desarrollo de la impresión, tratando de evitar fallas y poder apagar el equipo en caso de que fuese necesario. Lo conveniente fue impedir al máximo cualquier evento que pudiera afectar los resultados.

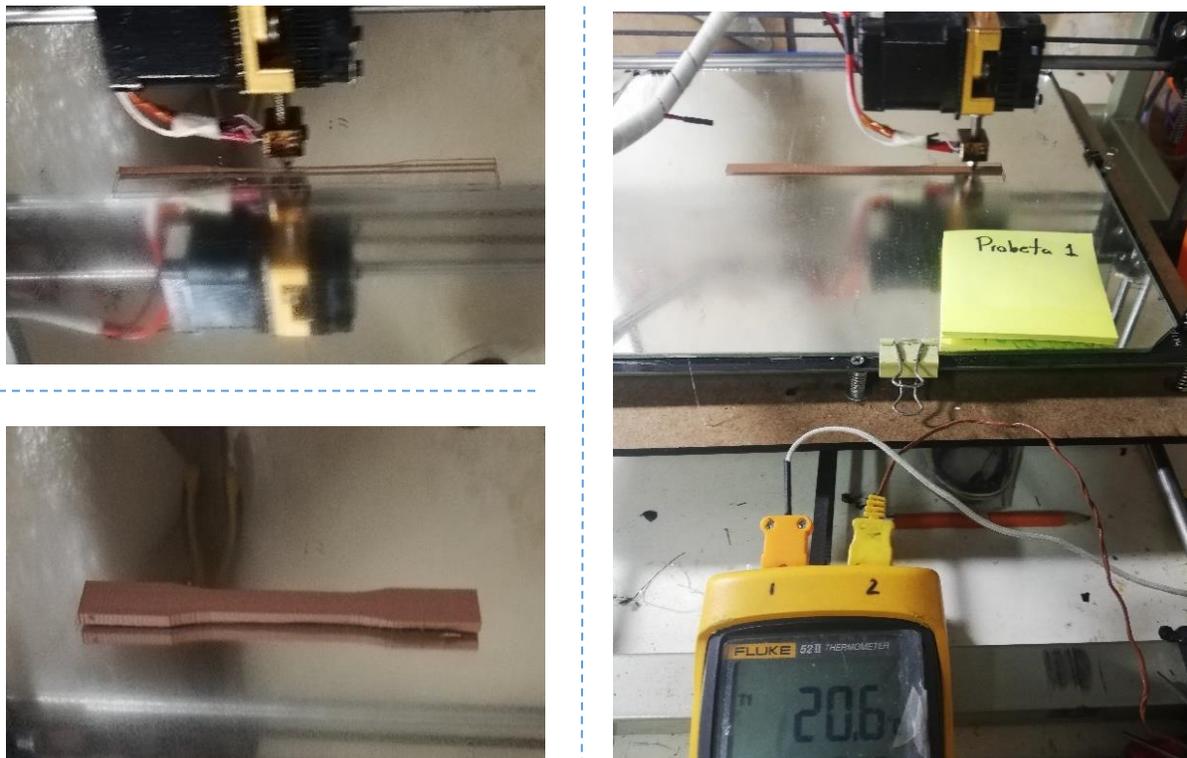


Figura 35. Proceso impresión 3D [Autor]

Las siguientes tablas especifican los valores tomados para los parámetros fijos (temperatura cama) y se indican las variables según cada experimento (tipo de material, temperatura extrusora). Se ha intentado mantener una temperatura ambiente semejante en todas las impresiones para obtener resultados con más validez, así como se ha impreso todo el conjunto de muestras con el mismo equipo de impresión previamente expuesto. Es importante detallar cada dato pues cualquier variable podrá marcar una diferencia en la comparación y análisis de resultados.

Tabla 4. Impresión probetas PLA transparente[Autor]

<i>Probeta N°</i>	MATERIAL	T. Cama (°C)	T. Extrusor (°C)	T.Ambiente	
				T1(°C)	T2(°C)
1	PLA Transparente	60	200	20,8	20,8
2	PLA Transparente	60	200	20,6	20,6
3	PLA Transparente	60	200	20,6	20,6
4	PLA Transparente	60	200	20,8	21,12
5	PLA Transparente	60	200	20,8	20,8
6	PLA Transparente	60	200	20,6	20,6
7	PLA Transparente	60	200	20,8	21,12

Tabla 5. Impresión probetas PLA-COBRE[Autor]

<i>Probeta</i> <i>N°</i>	MATERIAL	T. Cama (°C)	T. Extrusor (°C)	T.Ambiente	
				T1(°C)	T2(°C)
1	Cobre	60	205	20,1	20,2
2	Cobre	60	205	19,3	19,2
3	Cobre	60	205	19,6	19,9
4	Cobre	60	205	19,7	19,9
5	Cobre	60	205	20,2	21
6	Cobre	60	205	19,9	20,8
7	Cobre	60	205	20,3	20,7

Tabla 6. Impresión probetas PLA-ARCILLA[Autor]

<i>Probeta</i> <i>N°</i>	MATERIAL	T. Cama (°C)	T. Extrusor (°C)	T.Ambiente	
				T1(°C)	T2(°C)
1	Arcilla	60	220	19,4	20,1
2	Arcilla	60	220	19,4	19,6
3	Arcilla	60	220	19,3	20,2
4	Arcilla	60	220	19,4	19,6
5	Arcilla	60	220	19,8	19,9
6	Arcilla	60	220	20,1	20,4
7	Arcilla	60	220	20,7	20,9

Tabla 7. Impresión probetas PLA-CEDRO[Autor]

<i>Probeta</i> <i>N°</i>	MATERIAL	T. Cama (°C)	T. Extrusor (°C)	T.Ambiente	
				T1(°C)	T2(°C)
1	Cedro	60	220	20,2	21,1
2	Cedro	60	220	20,5	20,9
3	Cedro	60	220	20,1	20,4
4	Cedro	60	220	19,7	20,4
5	Cedro	60	220	19,9	20,4
6	Cedro	60	220	19,4	20,2
7	Cedro	60	220	19,3	20,4

Tabla 8. Impresión probetas PLA-COCO[Autor]

Probeta N°	MATERIAL	T. Cama (°C)	T. Extrusor (°C)	T.Ambiente	
				T1(°C)	T2(°C)
1	Coco	60	230	20,3	20,7
2	Coco	60	230	20	20,5
3	Coco	60	230	20,2	20,6
4	Coco	60	230	20,6	20,8
5	Coco	60	230	20	20,6
6	Coco	60	230	20	20,6
7	Coco	60	230	19,5	19,8

4.5 Caracterización mecánica

4.5.1 Tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Con el objetivo de caracterizar la resistencia a la tensión de estructuras fabricadas con los filamentos de PLA, PLA/Cobre, PLA/Arcilla, PLA/Cedro y PLA/Coco, se realizó según la norma ASTM D638 para materiales plásticos, el ensayo de tensión a cada muestra. La norma explica las consideraciones del montaje de la probeta en la máquina de ensayos y puesta en marcha, como lo es la alineación del eje longitudinal de la probeta con la línea imaginaria que une las dos mordazas; al igual el establecer la velocidad de la prueba a la velocidad indicada según el tipo de probeta, siendo 5 mm/min para este caso; entre otras consideraciones. La velocidad fue la misma para todos los ensayos.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in·min)	
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1	
		50 (2) ± 10 %	1	
		500 (20) ± 10 %	10	
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15	
		50 (2) ± 10 %	1.5	
		500 (20) ± 10 %	15	
		1 (0.05) ± 25 %	0.1	
		10 (0.5) ± 25 %	1	
	Nonrigid	III	100 (5) ± 25 %	10
			50 (2) ± 10 %	1
500 (20) ± 10 %			10	
IV		50 (2) ± 10 %	1.5	
		500 (20) ± 10 %	15	

Figura 36. Velocidad del ensayo de tensión[ASTMD638]

Se empleó la máquina de ensayos universales MTS Criterion TM **Figura 1Figura 37**, de la Universidad Pontificia Bolivariana de la ciudad de Bucaramanga con las especificaciones presentadas en la Tabla 9.



Figura 37. Máquina universal de ensayos MTS[Autor]

El equipo trabaja junto a un software de análisis de datos TW Elite versión August 2016, el cual tiene una interfaz de fácil uso entre el usuario y la máquina de ensayos, que permite programar el tipo de ensayo a realizar, ya sea de forma manual o por medio de su base de datos, que contiene programas y normas estandarizadas predefinidas de la ASTM, ISO, EN, BS, DIN, entre otras.

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la máquina universal MTS[Autor]

Nombre	<i>MTS Criterion TM</i>
Modelo	<i>43</i>
Fabricante	<i>MTS</i>
País de fabricación	<i>Estados Unidos</i>
Capacidad	<i>10KN</i>
Distancia entre columnas	<i>425mm</i>
Dimensiones	<i>794mm base, 1616mm altura</i>
Distancia entre mordazas	<i>1000mm</i>
Voltaje	<i>110 V</i>
Frecuencia	<i>100 Hz cte</i>

Se realiza la toma de mediciones de la probeta. Aunque la muestra este estandarizada con una sola medida existen pequeñas variaciones en sus longitudes de ancho y espesor por influencia del diámetro del extrusor de la impresora. Además, se tomó la longitud calibrada de cada muestra de igual manera, cada uno de estos datos tienen una mínima variación.



Figura 38. Toma de mediciones [Autor]

Las partes anchas de la probeta se fijaron en las mordazas. En este caso, la mordaza inferior es fija mientras que la superior es móvil y será la que aplique la carga en sentido ascendente. El equipo cuenta con un agarre seguro y propio para este estilo de muestras lo cual ayudo a no dejar marcas ni daños en las probetas.



Figura 39. Montaje Ensayo de Tracción[Autor]

Tabla 10. Mediciones de probetas [Autor]

PLA							
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROM	DESV
<i>Ancho [mm]</i>	13.1	13.2	13.0	13.3	12.8	13.080	0.172
<i>Espesor [mm]</i>	3.3	3.6	3.4	3.5	3.2	3.400	0.141
<i>Longitud calibrada [mm]</i>	92.6	90.9	96.3	94.2	90.7	92.940	2.106
PLA/ 80% COBRE							
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROM	DESV
<i>Ancho [mm]</i>	13.0	12.9	13.1	12.9	12.8	12.940	0.102
<i>Espesor [mm]</i>	3.3	3.1	3.2	3.2	3.1	3.180	0.075
<i>Longitud calibrada [mm]</i>	92.2	93.4	93.0	92.2	89.6	92.080	1.324
PLA/ 50% ARCILLA							
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROM	DESV
<i>Ancho [mm]</i>	13.0	13.2	13.1	13.0	12.6	12.980	0.204
<i>Espesor [mm]</i>	3.2	3.3	3.4	3.3	3.2	3.280	0.075
<i>Longitud calibrada [mm]</i>	93.3	94.2	94.6	94.4	89.6	93.220	1.864
PLA/ 40% CEDRO							
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROM	DESV
<i>Ancho [mm]</i>	13.3	13.2	13.1	13.2	12.9	13.140	0.136
<i>Espesor [mm]</i>	3.5	3.5	3.4	3.4	3.2	3.400	0.110
<i>Longitud calibrada [mm]</i>	94.4	94.5	94.3	94.5	90.2	93.580	1.692
PLA/ 40% COCO							
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	PROM	DESV
<i>Ancho [mm]</i>	13.3	13.1	13.2	13.1	13.0	13.140	0.102
<i>Espesor [mm]</i>	3.3	3.4	3.3	3.3	3.0	3.260	0.136
<i>Longitud calibrada [mm]</i>	96.3	96.3	96.3	93.5	89.7	94.420	2.597

Durante los primeros pasos del ensayo de tracción, el material podría regresar a su estado original si la tensión se libera, siempre que el material se mantenga en la región de deformación elástica, pero tan pronto como el primer cambio suceda por el cual el material no pueda recuperarse completamente, se

inicia la deformación plástica. Para la mayoría de los materiales, la curva de esfuerzo/deformación proporciona una línea recta en la región de deformación elástica, pero la pendiente cambia notablemente cuando inicia la deformación plástica. La tensión en el punto de transición entre las deformaciones elástica y plástica se llama resistencia a la conformación (σ_y) también llamada límite elástico o esfuerzo de cadencia. Una vez que la tensión sobre el material haya excedido la resistencia a la conformación, no regresará por completo a su forma original. Aun cuando la deformación plástica haya iniciado, algunos materiales son capaces de manejar más tensión. La tensión aplicada a la fuerza más alta (lo máximo en la curva de esfuerzo/deformación) se llama resistencia a la tracción (σ_s) del material. La tensión en la cual el material finalmente se rompe por completo se llama resistencia a la ruptura (σ_B) o esfuerzo de ruptura[7].

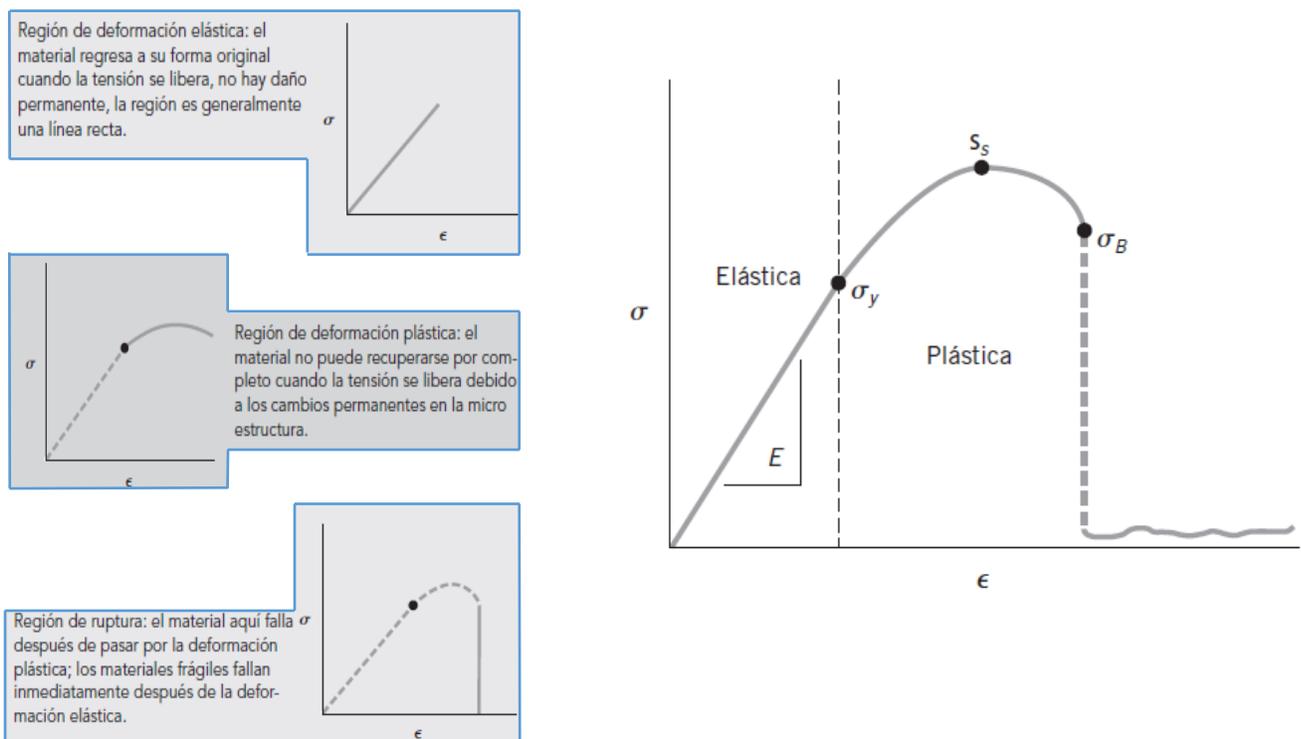


Figura 40. Curva representativa de esfuerzo/deformación[7]

No todos los materiales pueden experimentar la deformación plástica sin romperse. Los materiales dúctiles se pueden deformar sin romperse, mientras que los materiales que fallan completamente al inicio de la deformación plástica son llamados frágiles. Para los materiales frágiles, la resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas. La pendiente de la curva de esfuerzo/deformación en la región elástica tiene tres nombres diferentes: módulo de elasticidad (E), módulo de tracción o módulo de Young, el cual representa la rigidez del material (esto es, su resistencia a la deformación elástica). Los materiales con energías de enlace altas también tienen altos módulos elásticos porque se requiere más fuerza para estirarlos. Mientras que el tamaño del grano tiene un impacto significativo en la resistencia a la tracción, el módulo de Young no es impactado por la microestructura del material y se mantiene igual a pesar del tamaño del grano.

La cantidad de deformación que un material puede soportar sin romperse se llama ductilidad. Entre más dúctil es el material, es más fácil darle forma y maquinarlo, pero es menos probable que mantenga su forma bajo la tensión.

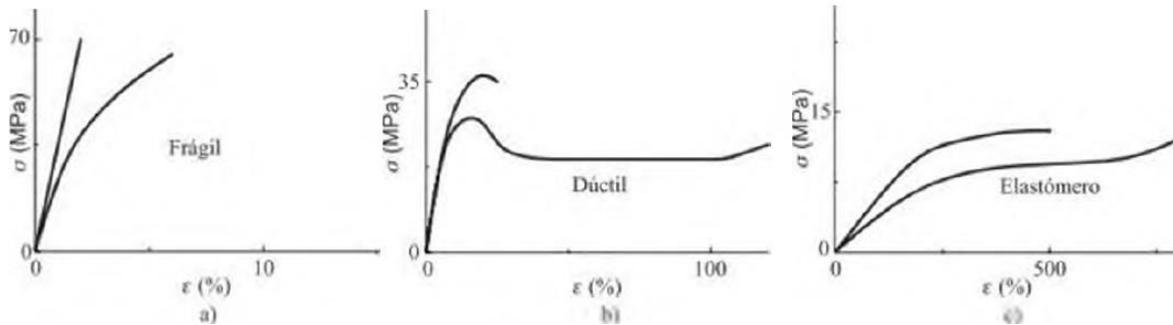


Figura 41. Curvas tensión-deformación de polímeros; a) frágiles, b) dúctiles, c) elastómeros[11]

Resulta útil conocer si una aleación es, a la vez, resistente y dúctil. Una aleación de elevada resistencia que además sea frágil puede resultar tan poco útil como una aleación deformable con una resistencia inaceptablemente baja. La Figura 42 compara estos dos casos extremos con una aleación con elevada resistencia y una ductilidad importante. El término tenacidad se emplea para describir esta combinación de propiedades. Esta propiedad puede definirse convenientemente como el área total bajo la curva tensión-deformación[12].

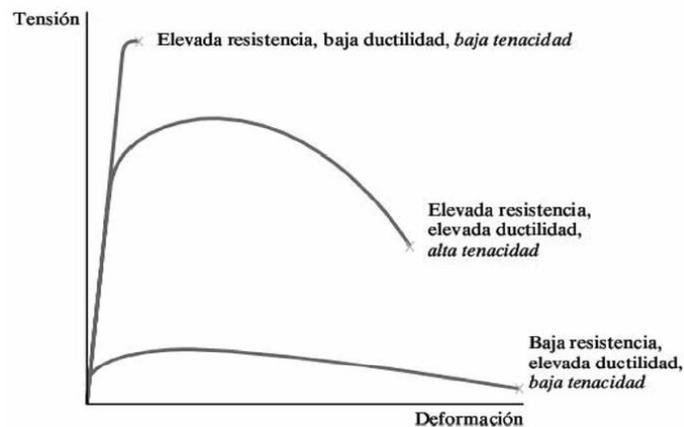


Figura 42. La tenacidad de una aleación o compuesto depende de una combinación de resistencia y ductilidad[12]

4.5.2 Microscopía electrónica de barrido

Más conocida como SEM (*Scanning Electron Microscopy*), utiliza un haz de electrones en lugar de luz para formar la imagen. Es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra un fino haz de electrones, acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV y que permite obtener información morfológica, topográfica y composicional de las muestras produciendo imágenes de alta resolución (de hasta 3 nm). El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra

realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz de electrones con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retro dispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos[36].



Figura 43. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV[36]

Para esta investigación, se empleó el equipo SEM de la Universidad de los Andes en la ciudad de Bogotá, el cual cuenta con un microscopio de barrido de electrones JEOL, modelo JSM 6490-LV, permite observar muestras de tamaños desde centímetros hasta muestras del orden de nanómetros, en los modos de alto y bajo vacío y permite realizar análisis químico mediante espectroscopia por dispersión de energía (EDS).

Tabla 11. Especificaciones técnicas del equipo SEM [Autor]

Nombre	<i>JEOL</i>
Modelo	<i>JSM-6490LV</i>
Fabricante	<i>JEOL</i>
País de fabricación	<i>Japón</i>
Capacidad	<i>70 mm Altura máxima- Pieza</i>
Interface grafica	<i>Gui</i>
Magnificaciones	<i>5x hasta 300.000x</i>
Energías de excitación	<i>0.1 KV hasta 30KV</i>
Norma preparación	<i>ASTM E3</i>

Se inició con el corte de las muestras requeridas para observación como se observa en la Figura 44 , indicando con una flecha el área que se esperaba analizar (área de fractura). Las muestras poco conductoras o no conductoras (como en el caso del PLA) tienen que ser recubiertas con una capa conductora para poder ser caracterizadas al SEM, si no, la muestra se cargaría estáticamente y no se podría formar bien la imagen, se emplean finas capas de oro o carbón depositadas sobre la superficie del

material mediante PVD (Physical Vapor Deposition). En esta investigación, se empleó el oro como material de recubrimiento de las muestras en la zona de la falla.



Figura 44. Preparación de las muestras [Autor]

A continuación, se muestra el montaje SEM de las cuatro probetas metalizadas de los materiales compuestos. La probeta PLA 100% no se tuvo en cuenta, pues se desea observar principalmente el comportamiento de la fase dispersa vs fase continua en la superficie de falla.

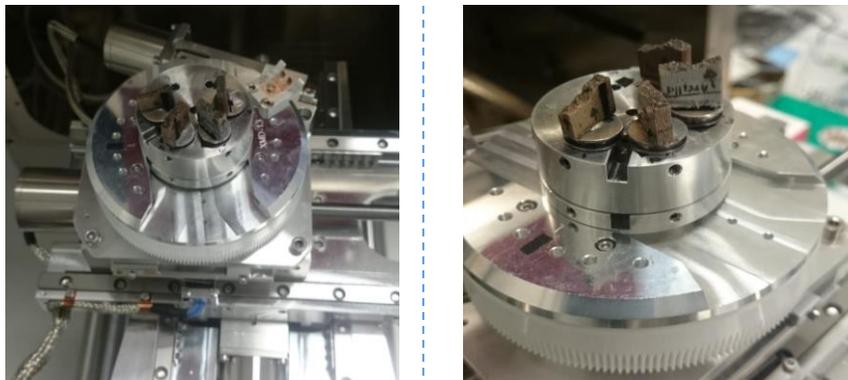


Figura 45. Montaje análisis de muestra SEM [Autor]

4.5.3 CES EduPack

CES EduPack es un exclusivo conjunto de recursos didácticos que proporciona apoyo a la enseñanza de materiales en áreas de Ingeniería, Diseño, Ciencias y Desarrollo sostenible. Proporciona una base de datos integral de información sobre materiales y procesos, es un poderoso software de materiales.

En el presente trabajo se empleó el software, para importar los datos obtenidos en el ensayo de tracción y mediante representación de burbujas revelar una aplicación en relación a las propiedades de los materiales. Para la incorporación de datos en el software CES EduPack, es fundamental conocer la densidad de cada tipo de material. Al revisar las fichas técnicas se observó que solo es proporcionado la gravedad específica, dato no aplicable para esta investigación. Como se muestra en la Figura 46 con un equipo de medida digital de peso en gramos se halló la masa. El volumen se obtuvo del CAD en Solidworks (9331.96 milímetros cúbicos o 9.33196 centímetros cúbicos) y con esta relación se encontró la densidad respectiva a cada tipo de material, empleando la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$



Figura 46. Toma de masas [Autor]

Tabla 12. Densidades de los materiales [Autor]

Densidad de materiales				
Material	Masa [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Densidad [kg/m ³]
PLA	11.1	9.33196	1.18946	1189.46
PLA/80%COBRE	26.7		2.86113	2861.13
PLA/50%ARCILLA	12.8		1.37163	1371.63
PLA/40%COCO	9.6		1.02872	1028.72
PLA/40%CEDRO	9.4		1.00729	1007.29

4.5.4 Simulación método elementos finitos ANSYS

La simulación computacional es ampliamente utilizada en las empresas para realizar análisis y mejorar la calidad de los productos y proyectos. Gran parte de estos análisis se realizan por medio del software ANSYS Mechanical que utiliza el Método de los Elementos Finitos, los cuales posibilitan la obtención de respuestas para innumerables problemas de ingeniería. El método puede ser aplicado en el diagnóstico y resolución de problemas de análisis estructural por medio de la obtención de desplazamientos, deformaciones y tensiones, también permite representar diversos escenarios y evaluar el desempeño de productos con la aplicación de criterios de resistencia, rigidez o fatiga. Además, las variaciones del método de los elementos finitos posibilitan el análisis térmico, acústico, dinámico, electromagnético y de fluidos para casos más simples de comportamiento lineal y otros no lineales, como cuando hay grandes desplazamientos o contacto entre partes de un montaje[37].

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del proceso de impresión en 3D se obtuvieron siete especímenes, pero se escogieron las cinco mejores probetas para ensayar a tracción y analizar sus propiedades.



Figura 47. Probetas antes del ensayo de tracción[Autor]

Todas las probetas lograron como resultado una fractura dentro del área de la longitud calibrada.



Figura 48. Probetas después del ensayo de tracción[Autor]

En la Figura 48 se visualiza las probetas fracturadas. Analizando las probetas de PLA es evidente que su fractura o falla se presentó en cada ensayo de la misma forma. Pasando al PLA/80%COBRE es evidente que las primeras probetas no tuvieron un alargamiento igual a las dos últimas, donde se observa una longitud mayor. En los materiales siguientes no se evidencia un alargamiento notable y sus fracturas estuvieron dentro del área calibrada, algunas se fracturaron en el centro y otras cercanas a sus bordes inferiores y superiores. Todas las probetas tienen una fractura de forma lineal exceptuando la probeta dos del PLA/80%COBRE, cuatro PLA/50%ARCILLA, uno, dos y tres del PLA/40%COCO y por último la probeta tres de PLA/40%CEDRO.

5.1. Análisis ensayos de tracción

Los datos obtenidos en el ensayo de tracción fueron importados al programa Matlab y Excel para de esta manera expresar una comparación en gráficas y tablas las curvas esfuerzo vs deformación de los diferentes materiales.

5.1.1 Ensayo de tracción PLA

Aunque cada material cuenta con una ficha técnica de propiedades, el PLA es un claro ejemplo que, con unos parámetros adecuados de impresión, la resistencia a la tracción aumenta de una manera notable. En la Figura 49 se representó, los cinco ensayos de tracción realizados a las probetas de PLA, donde, se observó que la gráfica de la probeta número cinco, es la de mayor resistencia a la tracción y la cuatro la de menor resistencia a la tracción. Además, todas las gráficas tienen comportamientos similares. Cabe resaltar que las gráficas representadas solo cuentan con una zona elástica, donde podrían volver a su forma original, en caso de dejar de aplicar la carga. Cuentan también con una fractura situada en la zona de transición a la zona plástica.

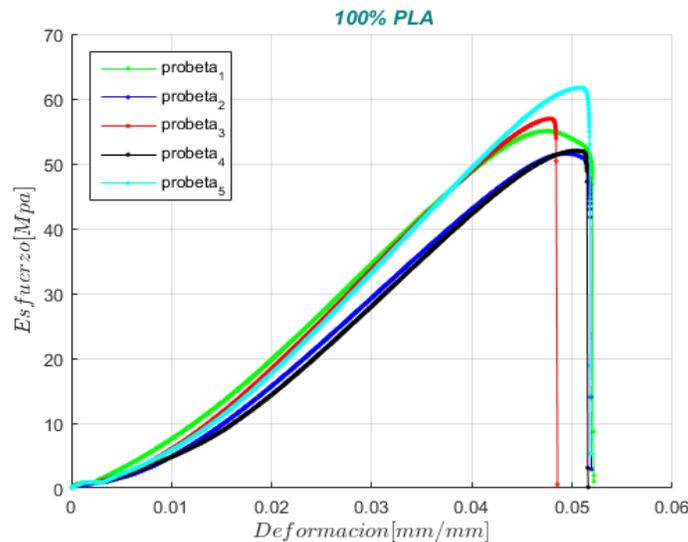


Figura 49. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA[Autor]

Con el objetivo de analizar más a fondo los ensayos, se realizó una comparación de sus resistencias a la tracción, deformaciones y módulos de Young. A continuación, cada uno de los datos mencionados se representarán mediante gráficas.

Recuerde que la desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. En esta investigación la desviación estándar se utilizó con el fin de establecer unos valores de referencia (límite mínimo-límite máximo) es posible que de esta manera haya un manejo efectivo de las propiedades reveladas durante los ensayos. Solo los valores dentro de los límites serán tenidos en cuenta.



Figura 50. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA [Autor]



Figura 51. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA [Autor]



Figura 52. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA [Autor]

En la Figura 50 se representa los valores de la resistencia a la tracción, observe como la probeta dos y cinco quedan fuera de los límites establecidos. Pasando a la Figura 51 la cual representa el módulo de Young, observe que su desviación estándar es relativamente baja y vuelve a quedar fuera de los límites las probetas dos y cinco. Por último en la Figura 52 se representa la deformación a la rotura y observe que la probeta tres y cinco en esta ocasión quedan fuera de los límites. Para la elección de las propiedades representativas del material, no se tomarán en cuenta las probetas dos, tres y cinco que estuvieron fuera del rango; analizando las propiedades de las probetas uno y cuatro, es evidente como la probeta uno se acerca siempre a los valores promedios de las propiedades, en comparación a la probeta número cuatro, que sus valores permanecen cercanos a los límites.

La probeta más representativa del PLA es el número uno representada en la Figura 53.

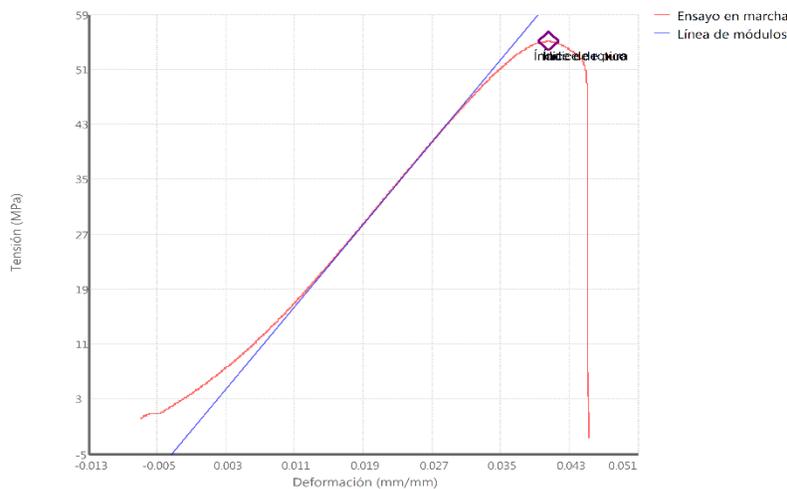


Figura 53. Análisis de la probeta uno- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA [MTS]

Recapitule que, para los materiales frágiles, la resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas. Observe que lo anterior citado se cumple en la gráfica, esto quiere decir que el PLA tiene un comportamiento frágil. La resistencia a la conformación, la resistencia

a la tracción y la resistencia a la ruptura tienen un valor de 55,0426 MPa con un módulo de Young de 1,4979 GPa, una deformación a la rotura de 4,064 % y una carga máxima de 2,379 KN.

5.1.2 Ensayo de tracción PLA/80%COBRE

El segundo material a comparar es el PLA/80%COBRE, en la Figura 54 se graficó los cinco ensayos realizados, donde se observa un comportamiento dúctil. La grafica de la probeta cinco es la de mayor resistencia a la tracción y la tres la de menor resistencia a la tracción. Además, se puede evidenciar que la probeta número cuatro fue la de mayor deformación y la uno la de menor deformación; es posible que las probetas de mayor deformación se adaptasen a factores de presión y temperaturas en el momento, lo cual influyó en el revelado de su verdadera ductilidad.

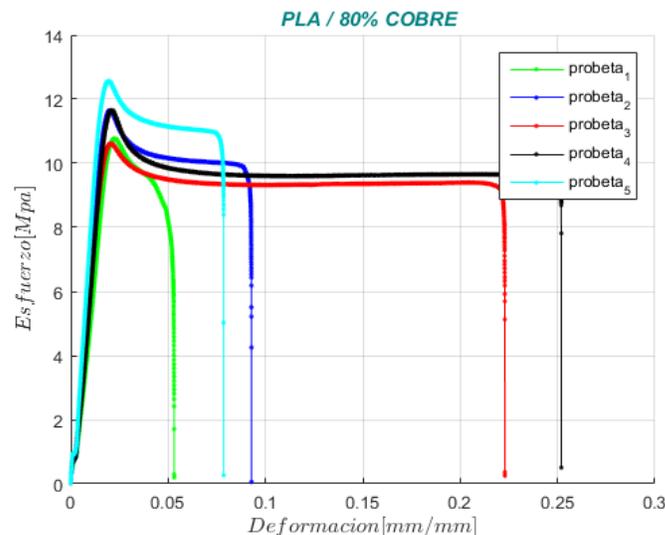
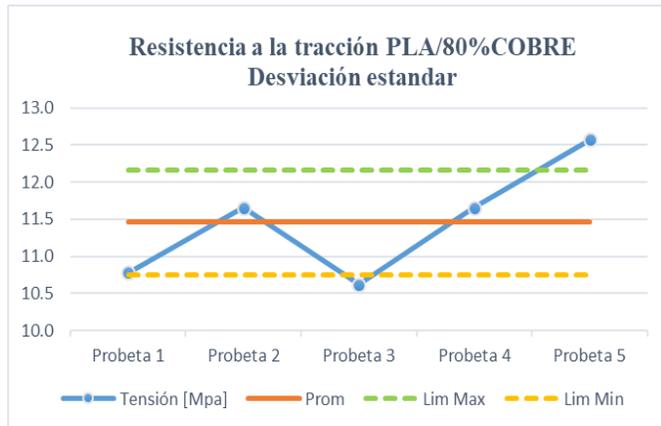


Figura 54. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/80%COBRE[Autor]

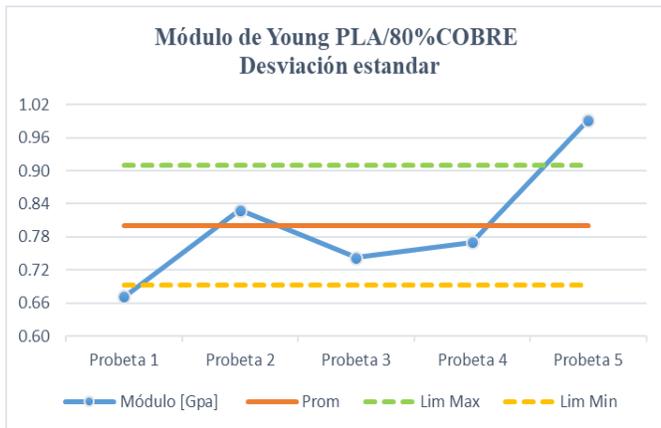
Analizando las gráficas de desviación estándar se observa en la Figura 55 se representa los valores de la resistencia a la tracción, observe que su desviación estándar es relativamente baja, además la probeta tres y cinco quedan fuera de los límites establecidos. Pasando a la Figura 56 la cual representa el módulo de Young, queda fuera de los límites las probetas uno y cinco. Por último en la Figura 57 se representa la deformación a la rotura y observe que la probeta uno y cuatro en esta ocasión quedan fuera de los límites.

Para la elección de las propiedades representativas del material, no se tomarán en cuenta las probetas uno, tres, cuatro y cinco que estuvieron fuera del rango; solo la probeta número dos permaneció dentro de la zona, es evidente como la probeta dos se acerca siempre a los valores promedios de las propiedades, en excepción en la figura de la deformación donde su deformación es baja en comparación a la deformación promedio.



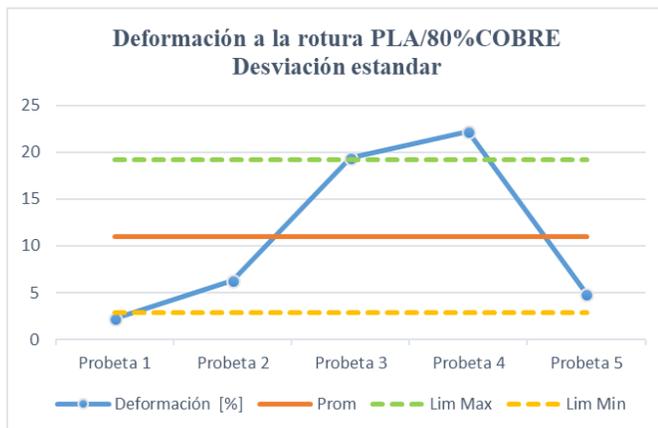
Tensión [Mpa]	
Promedio	11.457
DESV	0.704
Limite maximo	12.160
Limite minimo	10.753

Figura 55. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/80%COBRE[Autor]



Módulo [Gpa]	
Promedio	0.801
DESV	0.108
Limite maximo	0.909
Limite minimo	0.693

Figura 56. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/80%COBRE[Autor]



Deformacion[%]	
Promedio	10.991
DESV	8.151
Limite maximo	19.141
Limite minimo	2.840

Figura 57. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/80%COBRE[Autor]

La probeta más representativa del PLA/80%COBRE es la número dos representada en la Figura 58

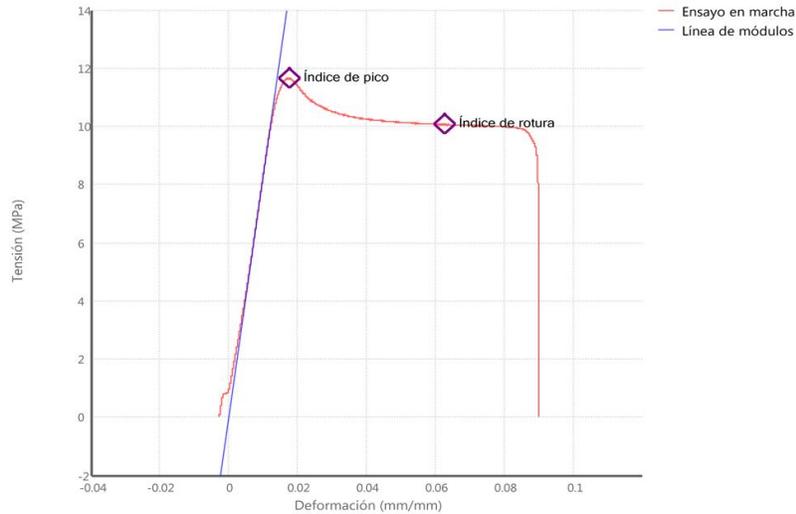


Figura 58. Análisis de la probeta dos- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/80%COBRE [MTS]

En la Figura 58 se observa que el PLA/80%COBRE, tiene una zona de deformación elástica y una zona de deformación plástica. Su resistencia a la conformación es igual a su resistencia a la tracción, que quiere decir esto; el material al estar en el punto de transición no logra seguir soportando tensiones más altas que esta, lo cual hace que su carga disminuya, pero aun es capaz de seguirse deformándose hasta el punto de su fractura.

La resistencia a la conformación y la resistencia a la tracción tienen un valor de 11,6572 MPa y la resistencia a la ruptura tienen un valor aproximado de 9,9979 MPa con un módulo de Young de 0,8289 GPa, una deformación a la rotura de 6.293% y una carga maxima de 0,466 KN.

5.1.3 Ensayo de tracción PLA/50%ARCILLA

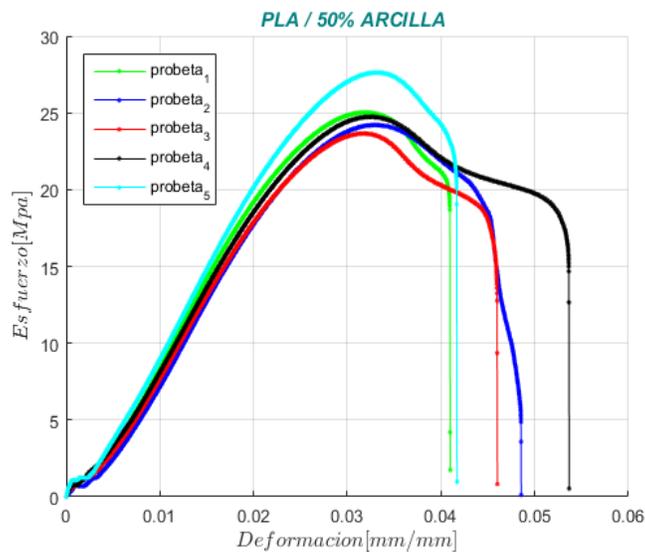


Figura 59. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/50%ARCILLA[Autor]

El tercer material a comparar es el PLA/50%ARCILLA, en la Figura 59 se graficó los cinco ensayos realizados, donde se observa un comportamiento de las probetas similar en la zona de deformación elástica, pero al llegar a la transición, las probetas divergen en toda la zona de deformación plástica. La grafica de la probeta cinco es la de mayor resistencia a la tracción y la tres la de menor resistencia a la tracción; la gráfica de la probeta cuatro es la que presenta mayor deformación y la uno la de menor deformación. Estas graficas presenta un comportamiento similar a la del PLA/80%COBRE en relación a sus deformaciones, comienza con ensayos con poca deformación y aumenta su deformación a la medida que va aumentando el número de probeta.

A continuación, se representarán las propiedades del material de acuerdo a la desviación estándar obtenidas de los ensayos.

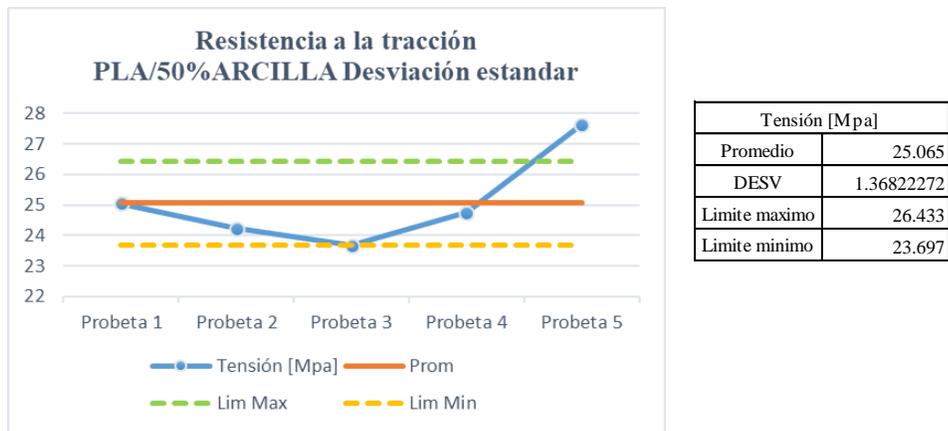


Figura 60. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/50% ARCILLA[Autor]

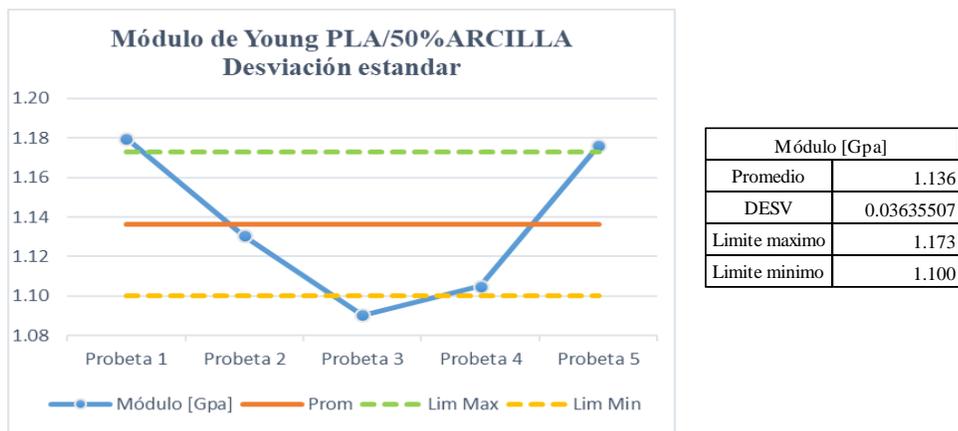


Figura 61. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/50%ARCILLA[Autor]

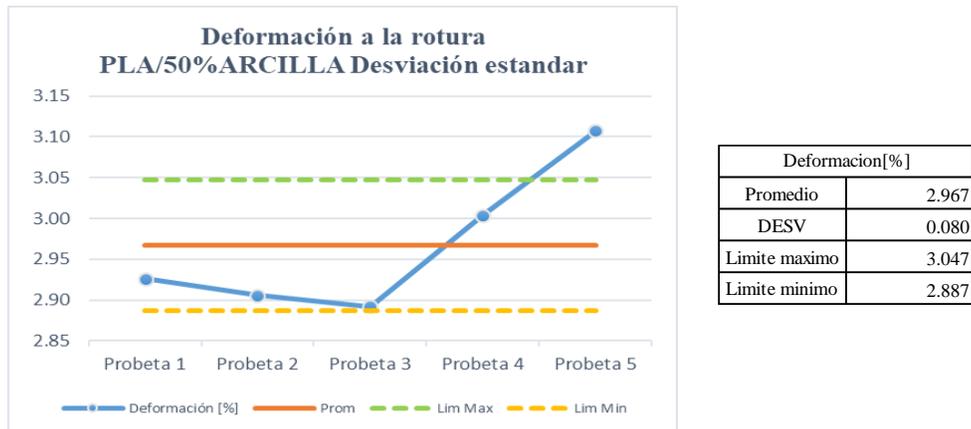


Figura 62. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/50% ARCILLA [Autor]

En la Figura 60 se representa los valores de la resistencia a la tracción, observe que la probeta tres y cinco quedan fuera de los límites establecidos. Pasando a la Figura 61 la cual representa el módulo de Young, queda fuera de los límites las probetas uno, tres y cinco. Por último, en la Figura 62 se representa la deformación a la rotura y observe que la probeta cinco en esta ocasión queda fuera de los límites. Para la elección de las propiedades representativas del material, no se tomarán en cuenta las probetas uno, tres y cinco que estuvieron fuera del rango; solo la probeta número dos y cuatro permanecieron dentro de la zona, es evidente como la probeta dos se acerca solo en la gráfica de módulo de Young al valor promedio en las demás propiedades queda cerca a los límites, la probeta cuatro se acerca al valor promedio de las propiedades de resistencia a la tracción y deformación rotura.

La probeta más representativa del PLA/50% ARCILLA es el número cuatro representada en la Figura 63.

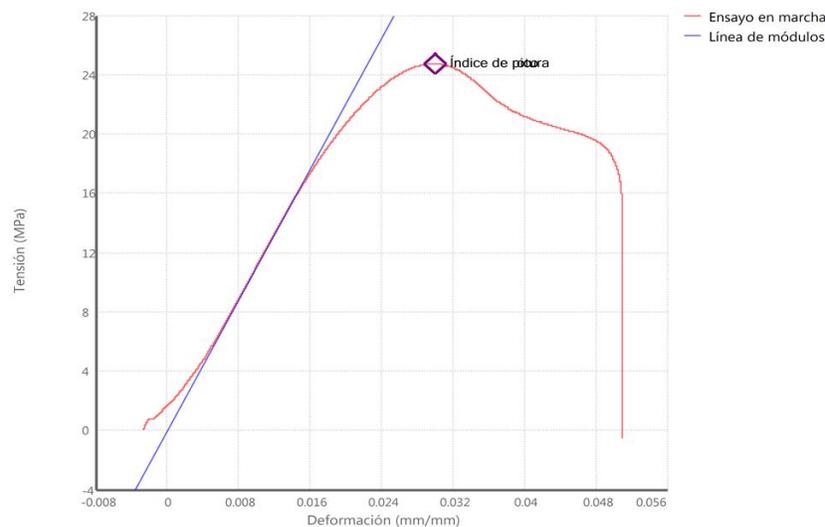


Figura 63. Análisis de la probeta cuatro- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/50% ARCILLA [MTS]

Al observar inicialmente las gráficas se duda si es o no un material dúctil, por su zona aparentemente plástica. Recuerde que en el apartado inicial de la metodología se tiene unas graficas como ejemplo y parámetros para comprender los comportamientos de los materiales de acuerdo a su grafica de esfuerzo vs deformación; donde las gráficas con un comportamiento frágil falla al iniciar su zona de transición, aspecto que no se reconoció en esta gráfica. La Figura 63 comprueba que el comportamiento del material es frágil donde la resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas. Después de su punto de rotura su carga disminuye, pero sigue deformándose en la zona plástica hasta llegar completamente al punto de falla.

La resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura tienen un valor de 24,7578 MPa con un módulo de Young. de 1,1048 GPa, una deformación a la rotura de 3,003 % y una carga máxima de 1,062 KN.

5.1.4 Ensayo de tracción PLA/40%COCO

El cuarto material a comparar es el PLA/40%COCO, en la Figura 64 se graficó los cinco ensayos realizados, donde se observa que sus graficas están situadas en la zona de deformación elástica, en el que el material fácilmente podría regresar a su forma inicial. En la transición de la zona elástica a zona plástica, el material falla, manifestando un comportamiento frágil.

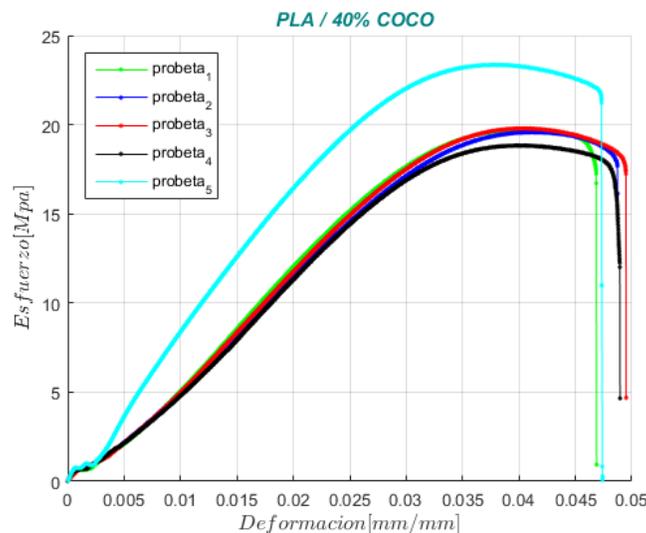
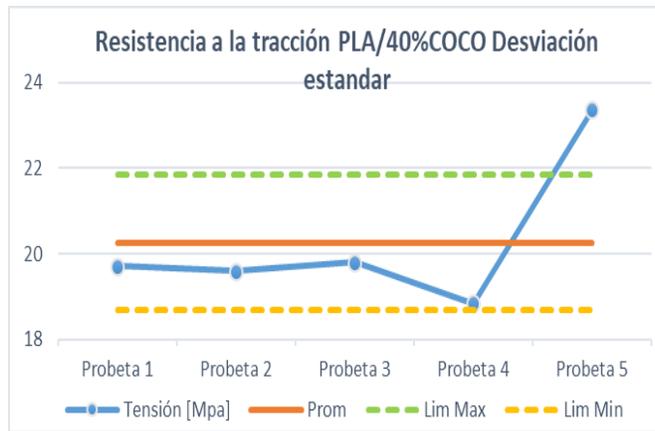


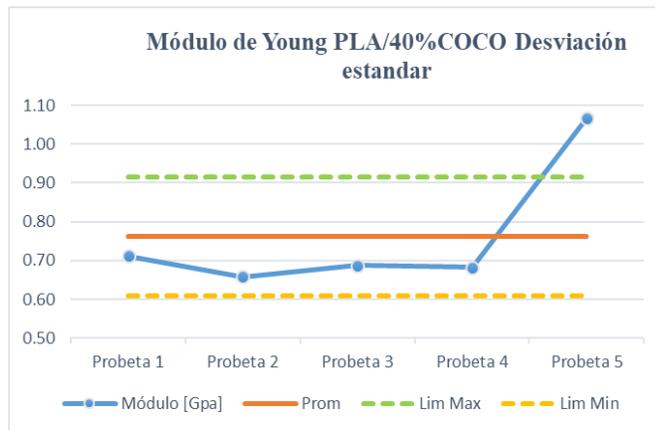
Figura 64. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%COCO[Autor]

La grafica de la probeta número cinco es la mayor resistencia a la tracción y la cuatro la de menor resistencia a la tracción; la gráfica tres muestra la mayor deformación elástica y la uno la menor deformación elástica. Es algo curioso ver como en cada tipo de material coinciden casi todos los comportamientos; es decir coinciden las probetas enumeradas de mayor y menor resistencia y mayor y menor deformación. A continuación, se representarán las propiedades del material de acuerdo a la desviación estándar obtenidas de los ensayos.



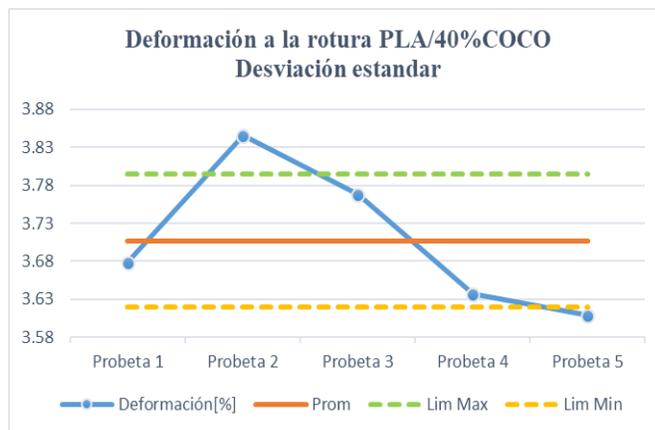
Tensión [Mpa]	
Promedio	20.259
DESV	1.590
Limite maximo	21.848
Limite minimo	18.669

Figura 65. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/40%COCO[Autor]



Módulo [Gpa]	
Promedio	0.761
DESV	0.153
Limite maximo	0.915
Limite minimo	0.608

Figura 66. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/40%COCO[Autor]



Deformacion [%]	
Promedio	3.707
DESV	0.087
Limite maximo	3.795
Limite minimo	3.620

Figura 67. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/40%COCO[Autor]

En la Figura 65 se representa los valores de la resistencia a la tracción, observe que la probeta cinco queda fuera de los límites establecidos. Pasando a la Figura 66 la cual representa el módulo de Young, queda fuera de los límites nuevamente la probeta cinco. Por último, en la Figura 67 se representa la deformación a la rotura y observe que la probeta dos y cinco en esta ocasión quedan fuera de los límites. Para la elección de las propiedades representativas del material, no se tomarán en cuenta las probetas dos y cinco que estuvieron fuera del rango; las probetas número uno, tres y cuatro permanecieron dentro de la zona, pero solo la probeta uno permaneció cerca los valores promedios de las propiedades.

La probeta más representativa del PLA/40%COCO es el número uno representada en la Figura 68.

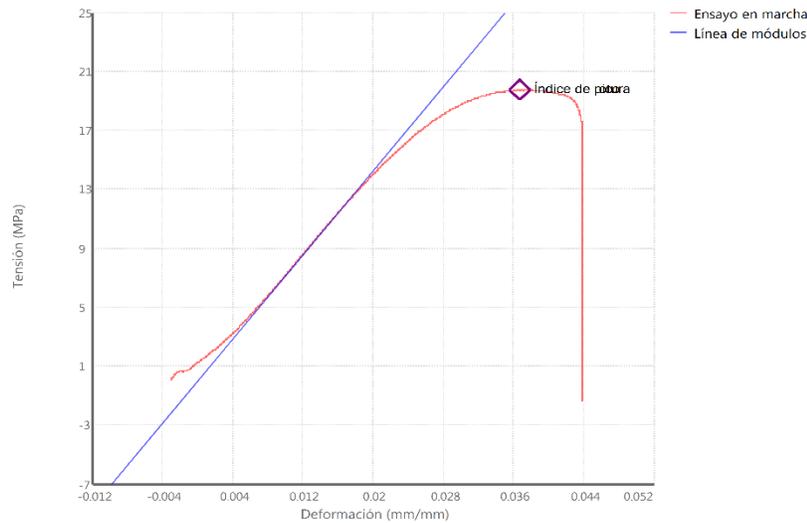


Figura 68. Análisis de la probeta uno- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%COCO[MTS]

La resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura tienen un valor de 19,7174 MPa con un módulo de Young de 0,7122 GPa y una deformación a la rotura de 3,678 % y una carga máxima de 0,865 kN.

5.1.5 Ensayo de tracción PLA/40%CEDRO

El último material a comparar es el PLA/40%CEDRO, en la Figura 69 se graficó los cinco ensayos realizados, donde se observa que sus gráficas están situadas en la zona de deformación elástica, en la que el material fácilmente podría regresar a su forma inicial. En la transición de la zona elástica a la zona plástica, el material falla, manifestando un comportamiento frágil.

El ensayo de la probeta número cinco es la de mayor resistencia a la tracción y la uno la menor; el ensayo de la probeta dos es la que tiene mayor deformación elástica y la tres la de menor deformación elástica; cabe resaltar que la diferencia entre las deformaciones elásticas de las gráficas no es significativa. Como se puede observar hay una divergencia en los esfuerzos, a medida que avanza el ensayo con relación al número de probeta aumenta, su esfuerzo aumenta sobreponiéndose un valor del otro.

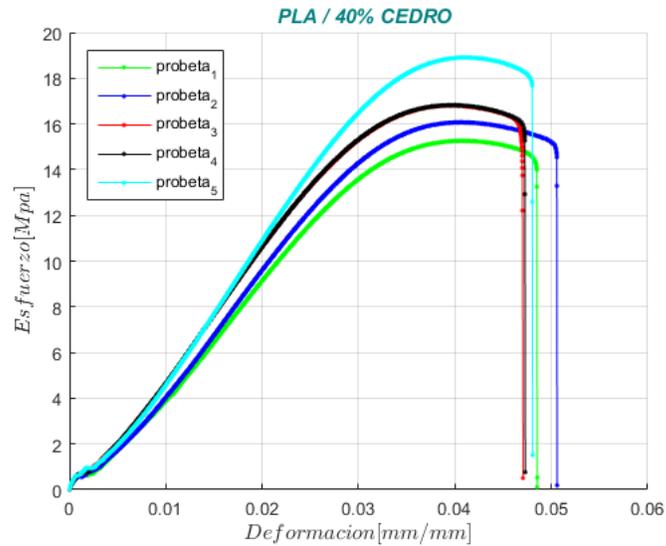
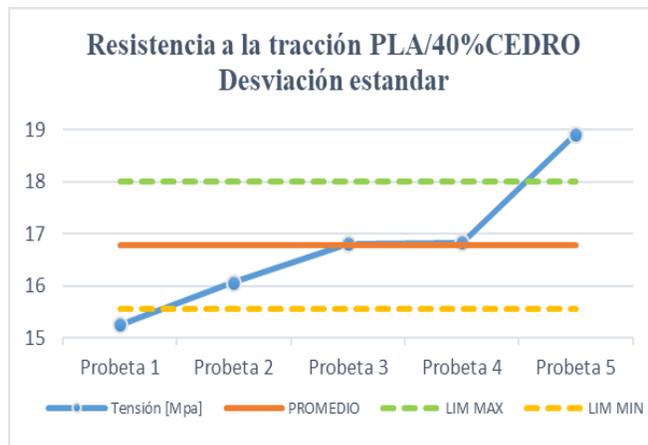


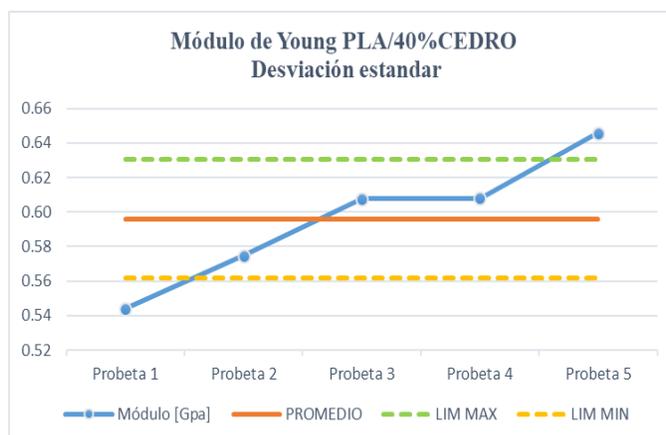
Figura 69. Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%CEDRO[Autor]

A continuación, se representarán las propiedades del material de acuerdo a la desviación estándar obtenidas de los ensayos.



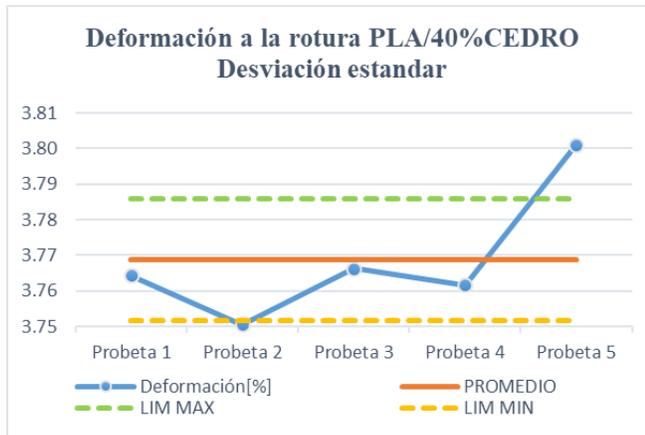
Tensión [Mpa]	
Promedio	16.781
DESV	1.211896706
Limite maximo	17.993
Limite minimo	15.569

Figura 70. Desviación estándar de la resistencia a la tracción del PLA/40%CEDRO[Autor]



Módulo [Gpa]	
Promedio	0.596
DESV	0.034356309
Limite maximo	0.630
Limite minimo	0.562

Figura 71. Desviación estándar del Módulo de Young del PLA/40%CEDRO[Autor]



Deformacion[%]	
Promedio	3.769
DESV	0.0171
Limite maximo	3.786
Limite minimo	3.752

Figura 72. Desviación estándar de la deformación a la rotura del PLA/40%CEDRO[Autor]

En la Figura 70 se representa los valores de la resistencia a la tracción, observe que la probeta uno y cinco quedan fuera de los límites establecidos. Pasando a la Figura 71 la cual representa el módulo de Young, queda fuera de los límites nuevamente la probeta uno y cinco. Por ultimo en la Figura 72 se representa la deformación a la rotura y observe que la probeta dos y cinco en esta ocasión quedan fuera de los límites. Para la elección de las propiedades representativas del material, no se tomarán en cuenta las probetas uno, dos y cinco que estuvieron fuera del rango; las probetas número tres y cuatro permanecieron dentro de la zona, aunque sus comportamientos fueron similares, solo la probeta tres coincidió cerca los valores promedios en todas las propiedades.

La probeta más representativa del PLA/40%COCO es el número tres representada en la Figura 73.

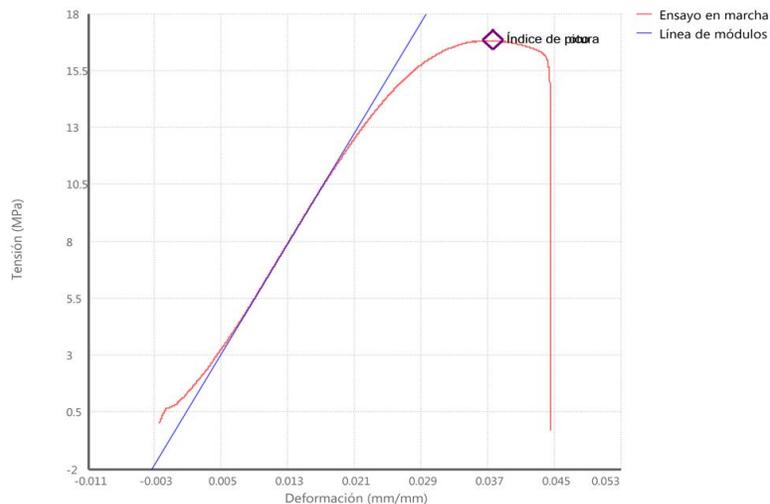


Figura 73. Análisis de la probeta tres- Diagrama esfuerzo vs deformación PLA/40%CEDRO[MTS]

La resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura tienen un valor de 16,811 MPa con un módulo de Young. de 0,6076 GPa y una deformación a la rotura de 3,7663% y una carga maxima de 0,749 KN.

5.1.6 Comparación de los materiales

Anteriormente se efectuó el análisis de cada material según la gráfica esfuerzo vs deformación, donde se desarrolló un análisis y comparación de los datos. La elección de la gráfica más representativa de acuerdo al tipo de material ensayado se especifica en la

Tabla 13. Probetas Representativas de los materiales. La probeta número cinco no fue preferencia en ningún material y no quiere decir que el ensayo se efectuó erróneamente, solo que sus valores no fueron considerados, por estar fuera de los rangos.

Tabla 13. Probetas Representativas de los materiales

Material	Ensayo representativo
PLA	Probeta 1
PLA/80%COCO	Probeta 2
PLA/50%ARCILLA	Probeta 4
PLA/40%COCO	Probeta 2
PLA/40%CEDRO	Probeta 3

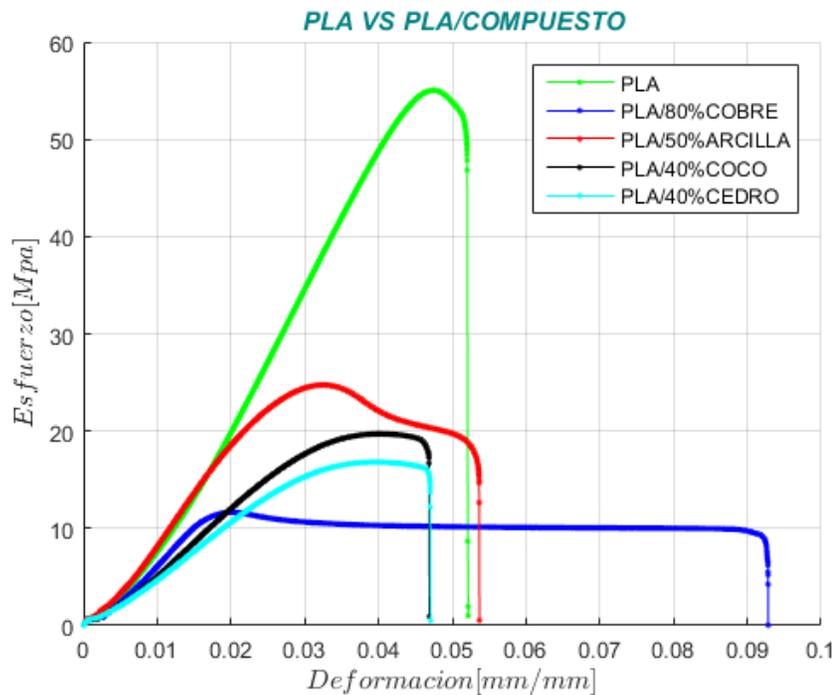


Figura 74. Comparación de los materiales ensayados [Autor]

La Figura 74 da una visión clara y comparativa de los materiales estudiados. Reconozca el PLA como el material con mayor resistencia a la tracción y el PLA/80%COBRE como el de menor resistencia a la tracción; también observe que el material de mayor deformación es el PLA/80%COBRE y el PLA/40%COCO es el que tiene menor deformación.

Estudiando cada representación gráfica, se demuestra como el porcentaje de PLA de cada material compuesto, es directamente proporcional a la resistencia de tracción; es decir, la fase continua o matriz, es la responsable de la resistencia del material compuesto. Por tal motivo el PLA/80%COBRE es el de menos resistencia con un porcentaje de 20% de PLA y el PLA/50%ARCILLA es el más resistente de los materiales compuesto con un porcentaje mayor. Todos, los materiales adquirieron un comportamiento frágil, exceptuando el PLA/80%COBRE el cual asumió un comportamiento ductil. Puede que a simple vista se cuestione los ensayos por el simple hecho de disminuir en cada material su resistencia; pero recuerde que a mayor resistencia mayor fragilidad; además, existe propiedades iguales o más influyentes. Vuelva atrás en la parte de las probetas impresas y note como el PLA a simple vista tiene un acabado superficial pobre, con una rugosidad notable, diferente al PLA/50%ARCILLA que al tacto tiene un acabado liso y suave, algo importante a la hora de imprimir piezas y evitar pérdidas de tiempo y dinero en procesos de acabado superficial.

A continuación, se analizará cada propiedad obtenida en los ensayos de tracción de las probetas representativas.

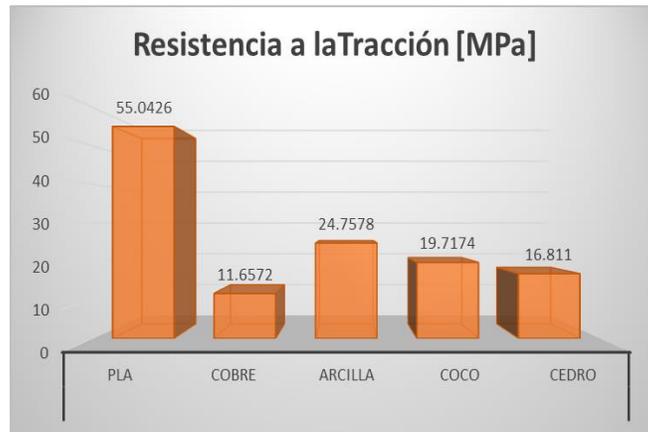


Figura 75. Análisis comparativo de la resistencia a la tracción de los materiales [Autor]

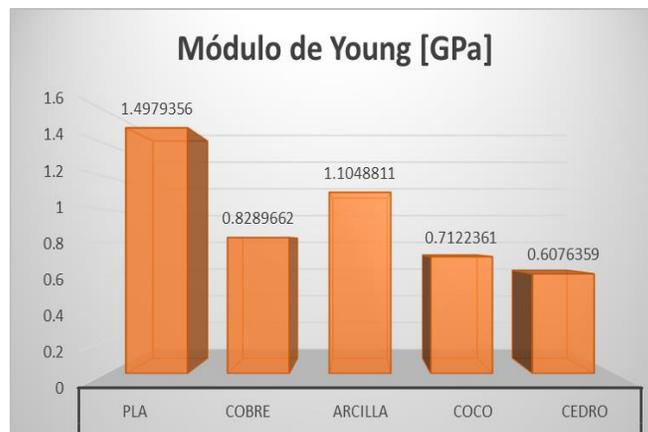


Figura 76. Análisis comparativo del módulo de Young [Autor]



Figura 77. Análisis comparativo de la deformación a la rotura [Autor]



Figura 78. Análisis comparativo de la carga máxima aplicada [Autor]

Anteriormente se esclareció que la resistencia en los ensayos, estuvo relacionada al porcentaje de PLA, explícito en la Figura 75. Continuando con la Figura 76, se representa el Modulo de Young, observe, que por naturaleza el PLA en un material rígido, al emplearlo como matriz en materiales compuestos, hace que sus refuerzos le proporcionen disminuir su rigidez. Pasando a la Figura 77, el PLA/80%COBRE presenta el mayor comportamiento de deformación; el cobre por naturaleza es ductil y al realizar esta combinación de PLA/80%COBRE posibilita al material a entrar en otra línea de aplicación. Por último, se muestra la carga a la cual cada material estuvo sometido.

Cada material compuesto demuestra propiedades únicas, que tal vez como materiales individuales no se podrían obtener, cerrando este apartado se concluye que dos materiales interesantes a seguir estudiando y buscar sus aplicaciones son el PLA/80%COBRE y el PLA/50%ARCILLA, no se descarta completamente los otros materiales porque existe la posibilidad que en otro tipo de ensayos demuestren mejores comportamientos.

5.2 Microscopia electrónica de barrido

El análisis morfológico de la superficie de falla de cada material compuesto, se basa en una serie de imágenes de diferentes intensidades del haz, logrando observar detalles que a simple vista no se consiguen apreciar. Cada material tiene diferentes comportamientos y es evidente en esta serie de imágenes.

5.2.1 Análisis morfológico PLA/80%COBRE

El análisis de las morfologías de cada uno de los materiales se llevó a cabo mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido SEM. Inicialmente, las muestras fueron recubiertas en un baño de oro con el propósito de mejorar la conductividad eléctrica de los especímenes y lograr una mejor resolución de las micrografías. Las superficies analizadas corresponden a una zona de la fractura obtenida durante los ensayos de tracción.

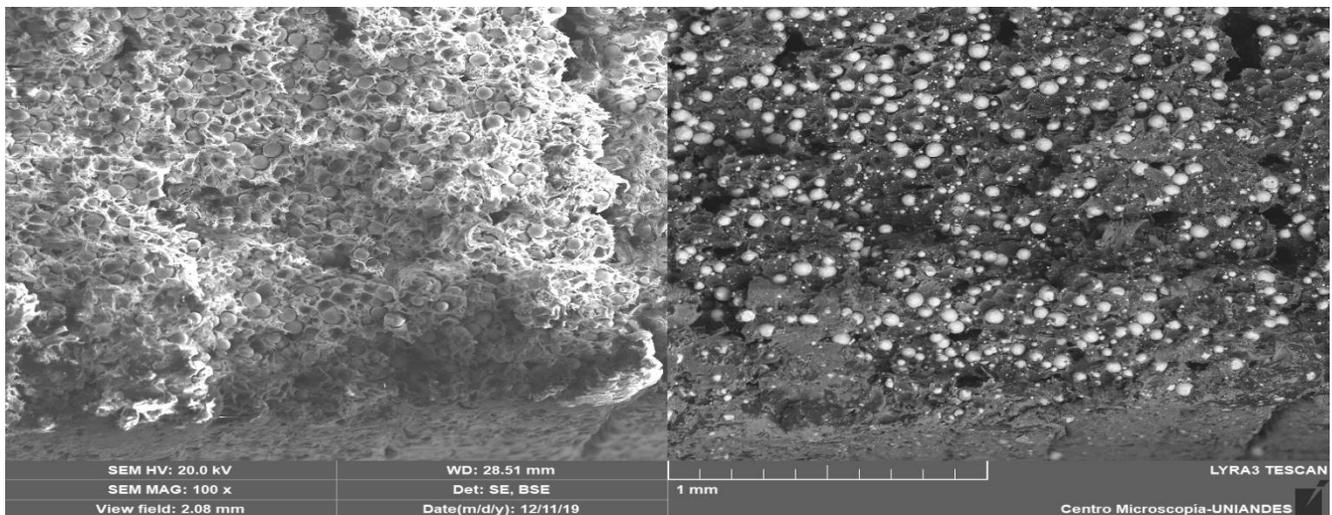


Figura 79. SEM MAG 100X PLA/80%COBRE [Autor]

De acuerdo con la Figura 79. SEM MAG 100X PLA/80%COBRE [Autor], se aprecia una dispersión óptima de las partículas cobre sobre la matriz de PLA, en donde se evidencia una fase de granos esféricos de tonalidad más clara que corresponden a la fase del material de cobre. De igual manera, en la imagen de la izquierda se observa unas ondulaciones en la matriz de PLA, que corresponden a una deformación en el material de forma dúctil, con lo que se puede corroborar con los ensayos obtenidos en las propiedades mecánicas.

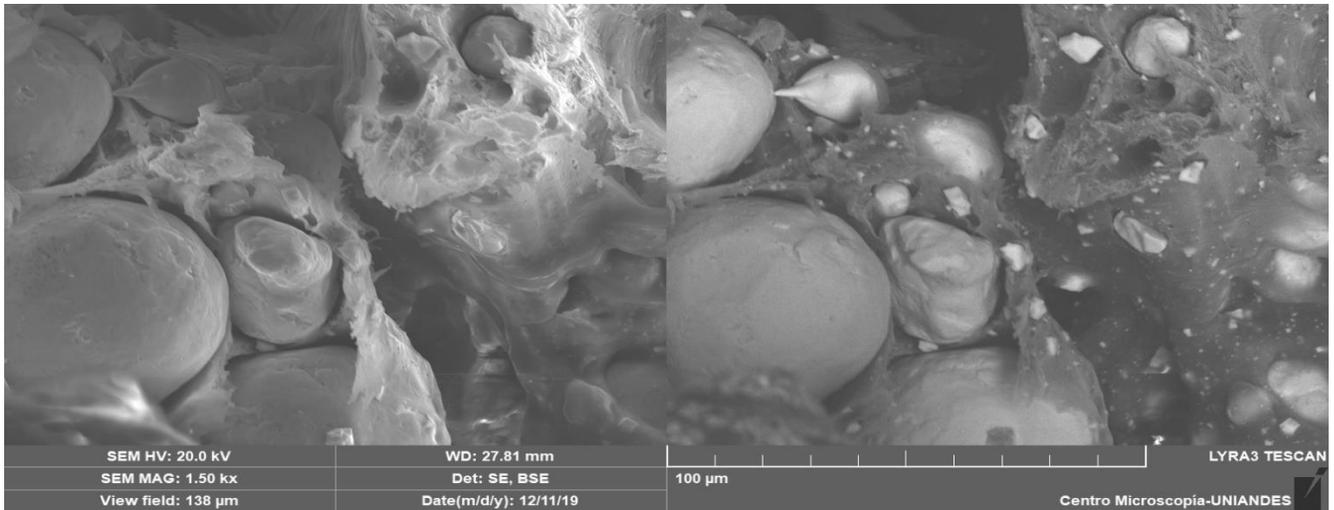


Figura 80. SEM MAG 1500X PLA/80%COBRE [Autor]

En la figura 80, se analiza el mismo sistema de PLA/80% cobre, logrando acercamientos de la muestra de hasta 100 micras. Para estas micrografías se observa la interface entre las partículas de cobre y la matriz de PLA, en donde se aprecia una interface optima entre constituyentes. De igual manera, se evidencia que la matriz de PLA ha presentado una deformación plástica.

5.2.2 Análisis morfológico PLA/50%ARCILLA

En el siguiente compuesto se analizó el material de PLA reforzado con 50% arcilla. En la imagen 81, se evidencia una fase de partículas de forma cilíndrica en una matriz de PLA, principalmente esta fase tubular corresponde a la arcilla y la fase oscura hace parte de la fase polimérica. De otro lado, las micrografías reflejan dispersión de las partículas de arcilla en la matriz, logrando una mayor superficie de área, con lo cual, se representa en las propiedades de tracción.

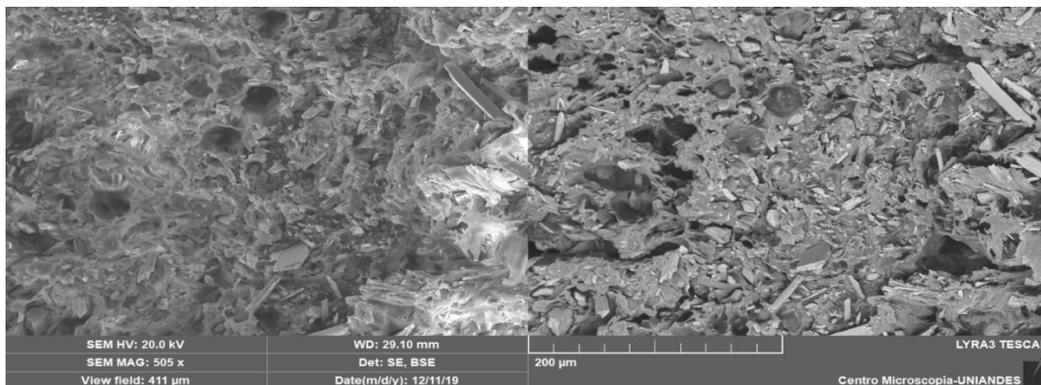


Figura 81. SEM MAG 505X PLA/50%ARCILLA[Autor]

En la micrografía de la figura 81, se muestra la unión entre los constituyentes, en donde se percibe una buena interface entre los materiales. De acuerdo, con lo observado la forma de la arcilla se indica de manera laminar, muy distinta a la observada en la micrografía anterior. De otro lado, se aprecian formas irregulares amorfas, que corresponden a la fase de la matriz de PLA.

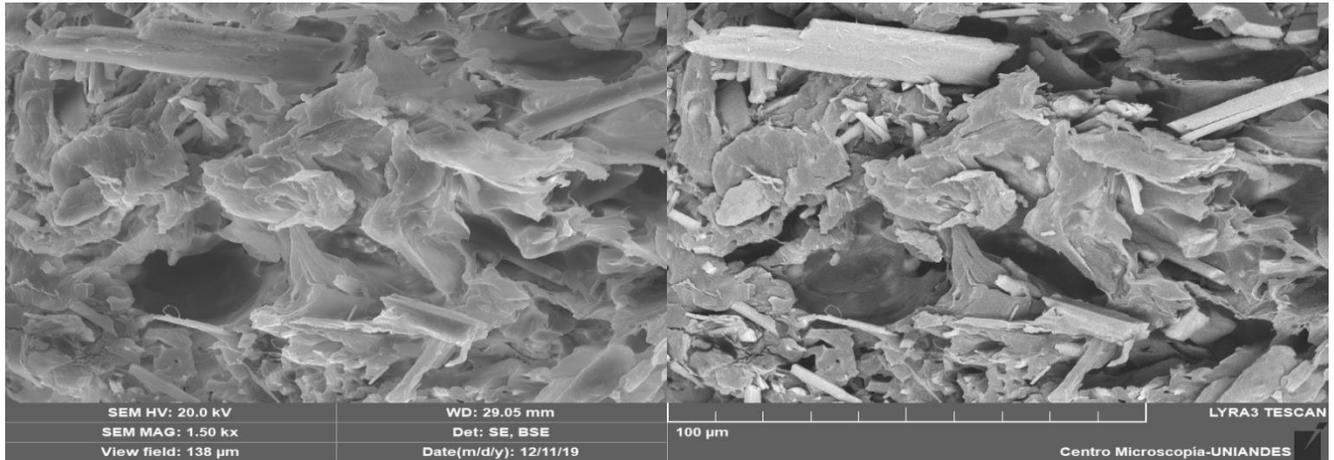


Figura 82. SEM MAG 1500X PLA/50%ARCILLA [Autor]

5.2.3 Análisis morfológico PLA/40%COCO

En la figura 83, se observa la microestructura para el compuesto de PLA/40%Coco tomada a 100 aumentos. Según la micrografía se observa una superficie irregular amorfa, propia del material de PLA. De otro lado, la fase de partículas de coco, no se distinguen con claridad con relación a la matriz, sin embargo, en algunas zonas se aprecia una estructura de forma cilíndrica, pero que no es clara debido en la matriz debido a que las tonalidades son muy parecidas entre las fases.

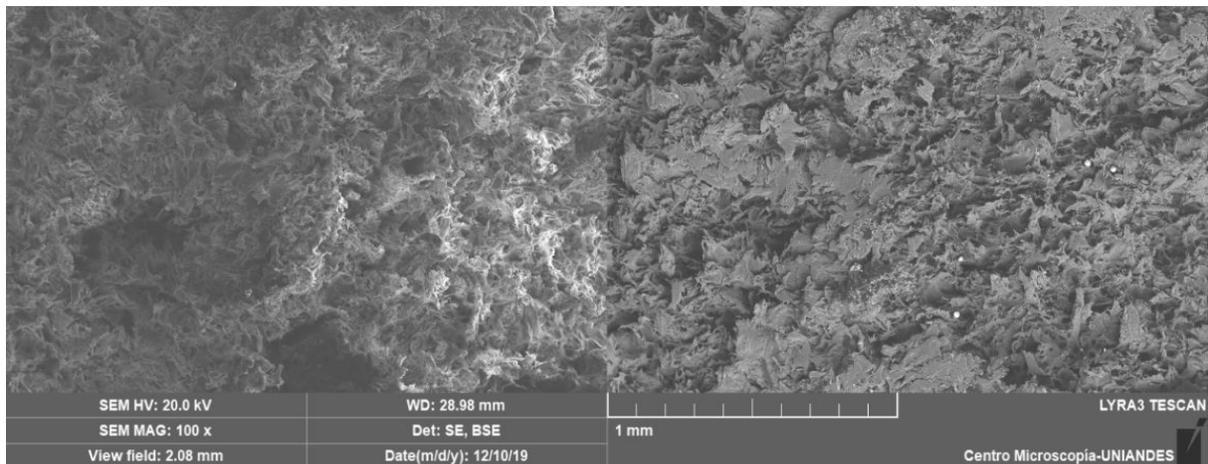


Figura 83. SEM MAG 100X PLA/40%COCO[Autor]

5.2.4 Análisis morfológico PLA/40%CEDRO

En la figura 84, se observa la microestructura para el compuesto de PLA/40%cedro registrada a 100 aumentos. Según la micrografía se observa una superficie irregular amorfa, propia del material de PLA. De otro lado, la fase de partículas de cedro, ocurre lo mismo que en el compuesto de PLA/40%coco, no se distinguen con claridad entre la fase de refuerzo y la fase termoplástica de PLA, sin embargo, en algunas zonas se aprecia una estructura de forma cilíndrica.

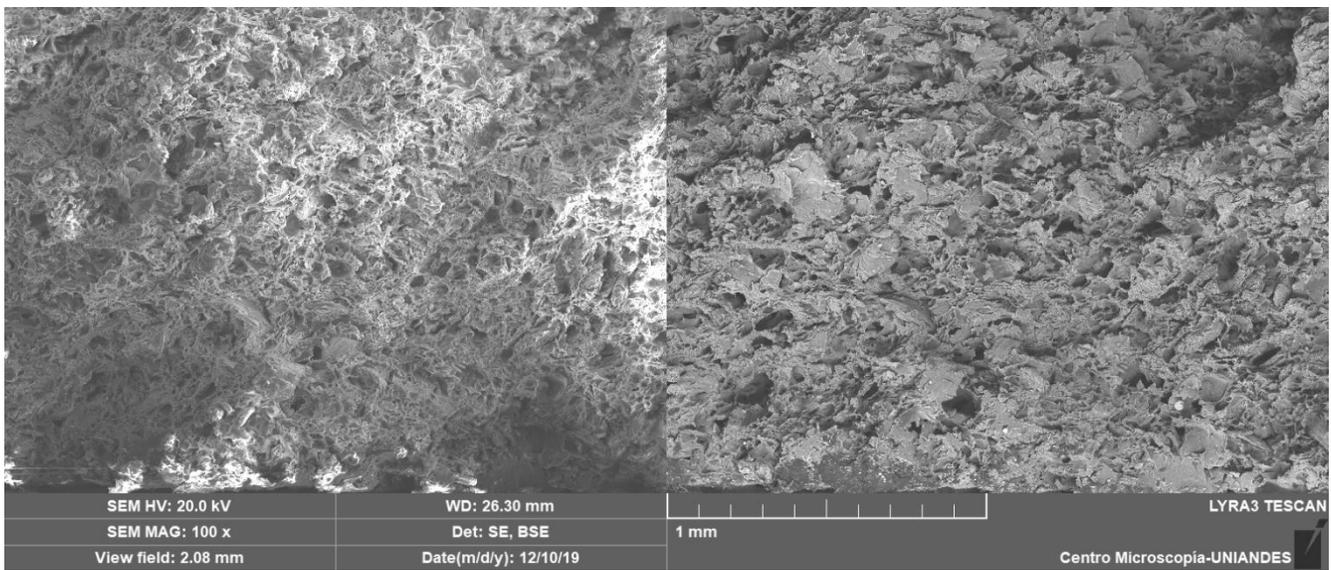


Figura 84. SEM MAG 100X PLA/40%CEDRO[Autor]

5.3 CES EduPack

La primera etapa de Ces EduPack es elegir una base de datos, en esta investigación se optó por la base de datos Nivel 3, que cuenta con una variedad de materiales plásticos, cerámicos, metálicos, compuestos etc. Aunque se puede iniciar analizando todos los materiales con las propiedades descubiertas, se inicia con realizar una comparación con los polímeros como se presenta en la Figura 85.

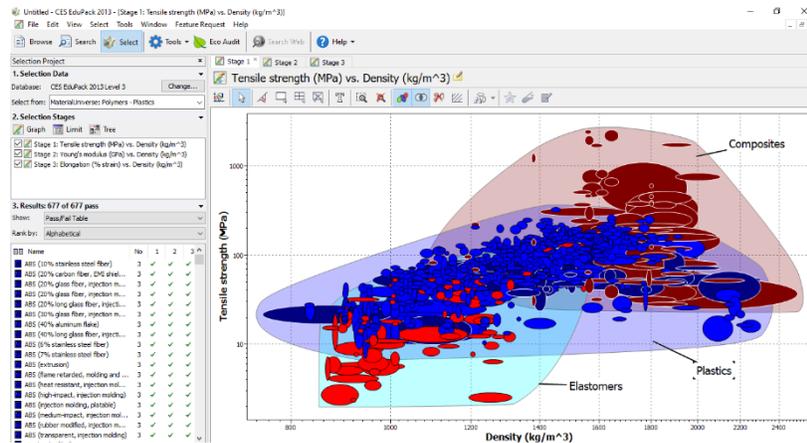


Figura 85. Análisis aplicativo Ces EduPack [Autor]

Al elegir la carpeta de comparación, surgen los materiales compuestos, los plásticos y los elastómeros, se podría retirar los materiales compuestos pero el software los ha seleccionado por que se componen de polímeros. Las propiedades a analizar en los diagramas de burbujas son el esfuerzo máximo a la tracción (*tensile strength*), porcentaje de elongación (*elongation*), módulo de Young (*young's modulus*) y densidad (*density*).

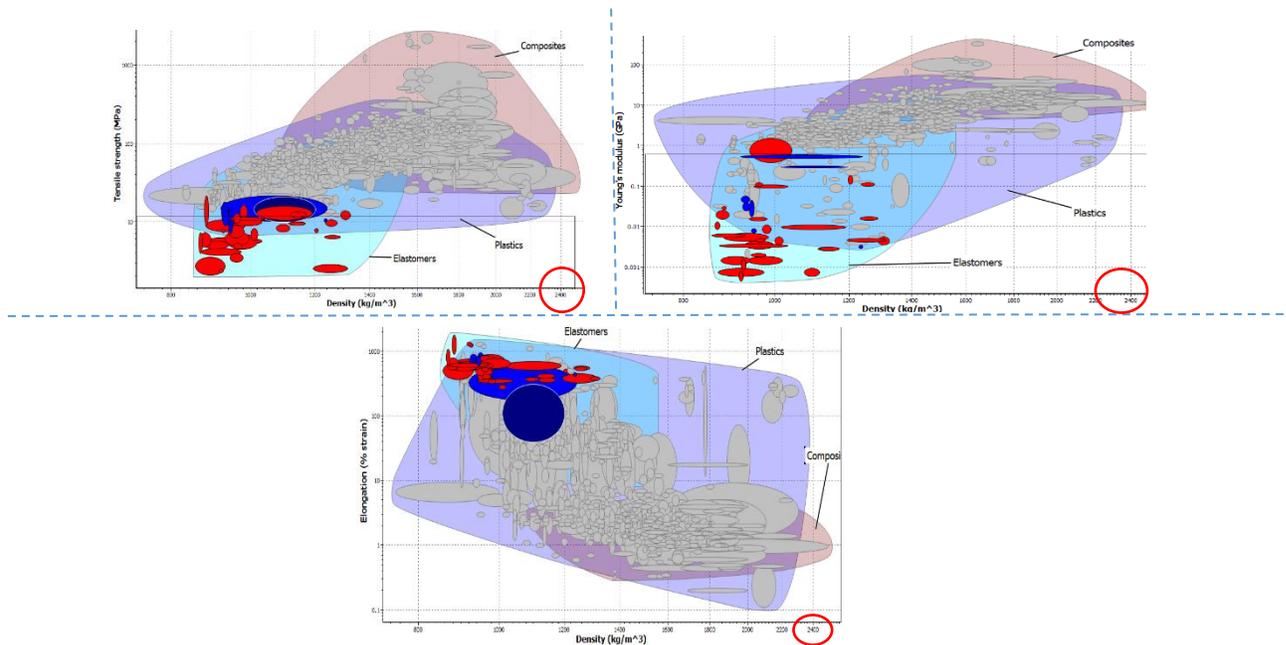


Figura 86. Densidad del PLA80% COBRE no encontrada en polímeros [Autor]

Se creó inicialmente los límites correspondientes a las propiedades del PLA/80%COBRE Figura 87, donde es evidente que los plásticos no tienen una densidad de 2861.13 kg/m³ que es la del material. Observe que, en cada una de las propiedades graficadas, ningún material se acerca o se asemeja a las propiedades del PLA/80%COBRE. Los polímeros por naturaleza son materiales con un porcentaje de elongación, resistencia y módulo de Young medio-alto, se opta por iniciar un análisis comparativo con otros tipos de materiales. En esta ocasión se seleccionó la base de datos universo de materiales (all materials).

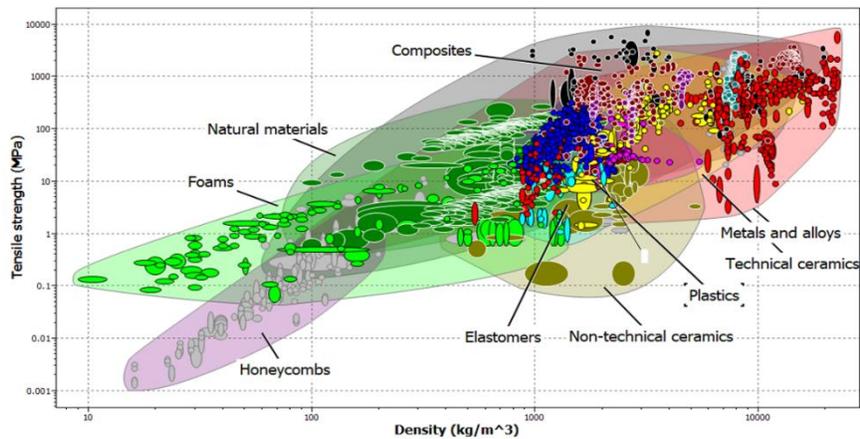


Figura 87. Selección universo de materiales [Autor]

A continuación, en cada propiedad se presentan los posibles materiales con propiedades comparables al PLA/80%COBRE, fue tedioso la elección de estos materiales, en primer lugar, por la cantidad de materiales y en segundo lugar porque en varios casos un tipo de material coincidía en una propiedad, pero en la siguiente no concordaba.

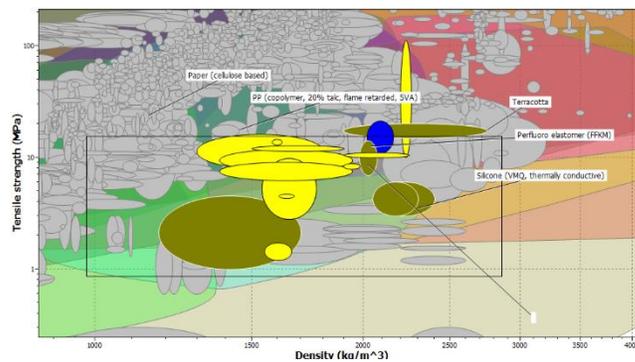


Figura 88. Esfuerzo a la tracción vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor]

La resistencia a la tracción del PLA/80%COBRE, es comparable con materiales como polypropileno copolymer 20, perfluoro elastomer, glas ionomer entre otros. En la Figura 89 se compara los módulos de Young y analice como los primeros materiales presentados en esfuerzo son descartados por un módulo de Young bajo y alto, pero hay un material que aún se observa el Terracota, la cual es una arcilla porosa de color marrón rojizo que se utiliza como medio para materiales de construcción y esculturas, también se observa una clase de grafito. Cada material fue analizado, visualizando su ficha técnica suministrada por el software.

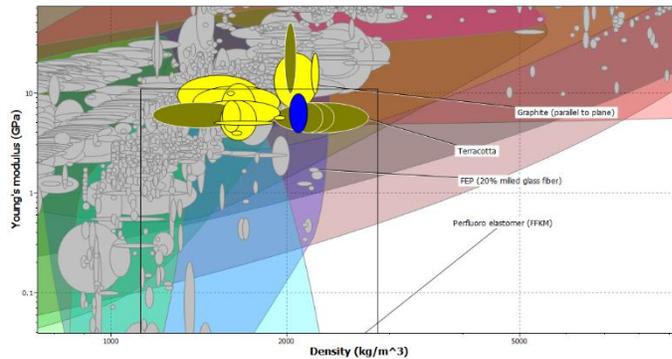


Figura 89. Módulo de Young vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor]

Por último, en la Figura 90 se realizó un análisis comparativo del porcentaje de elongación; ninguno de los materiales antes mencionados se encuentra en el rango de esta propiedad, el material que aún se resalta es la terracota, pero con un porcentaje de elongación bajo.

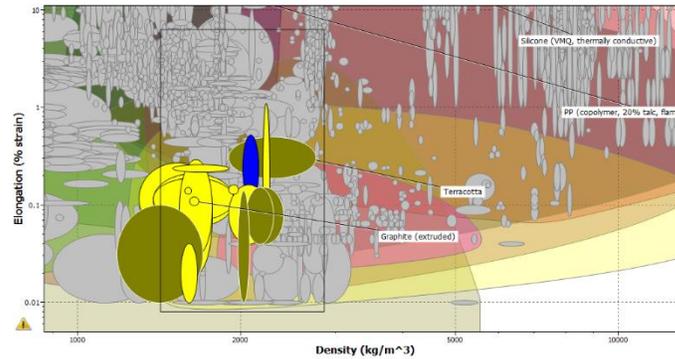


Figura 90. Porcentaje de Elongación vs Densidad PLA/80%COBRE [Autor]

Cabe resaltar que la densidad del PLA/80%COBRE es alta aun comparándose con los demás materiales lo cual limito el estudio. Otra peculiaridad en la cual se destacó el material, es que en las fichas técnicas que se estudiaron de los diferentes materiales con propiedades similares, estos tienen características semiconductoras lo cual lo hace un material prometedor a futuras investigaciones. En conclusión, el PLA/80%COBRE no reemplaza ningún material, pero podría ser candidato como material nuevo por sus propiedades, en algunas de las aplicaciones que se podría destacar son: dispositivos médicos y revestimientos, se ha fundamentado con dos fichas técnicas de materiales con semejanzas.

Perfluoro elastomer (FFKM)		Terracotta	
Recycle fraction in current supply	0.1 %	Primary material production: energy, CO2 and water	
Downcycle	✓	Embedded energy, primary production	* 13 - 14.4 MJ/kg
Combust for energy recovery	✗	CO2 footprint, primary production	* 1.82 - 2.01 kg/kg
Heat of combustion (net)	* 4 - 4.2 MJ/kg	Water usage	* 6.27 - 5.93 l/kg
Combustion CO2	* 0.818 - 0.859 kg/kg	Material processing: energy	
Landfill	✓	Grinding energy (per unit wt removed)	* 2.67 - 2.96 MJ/kg
Biodegrade	✗	Material processing: CO2 footprint	
A renewable resource?	✗	Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.201 - 0.222 kg/kg
Notes		Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction	
Typical uses	Sealing in extreme chemical and heat environments: Oil-field / down-hole; oil, gas, and chemical processing; food and pharmaceutical processes; medical devices, semiconductor processing, aerospace. O-rings, seal, gaskets, valve seats.	Recycle	✗
Other notes	Strengths: Greater heat (to 300C or higher with special compounding) and chemical resistance than fluoroelastomers (FKM). Low extractible and low particle grades available. Unfilled compound is transparent. Limitations: Difficult processing, high cost, poor physical properties at high temperature, high brittle point (most grades cannot be used below 0C), high creep even at room temperature.	Recycle fraction in current supply	0.1 %
Process information	Processing is normally conducted by specialists.	Downcycle	✓
		Combust for energy recovery	✗
		Landfill	✓
		Biodegrade	✗
		A renewable resource?	✗
		Notes	
		Typical uses	as tiles - for roofing and cladding. terracotta can also be formed into more complex shapes to form sculpt and pottery pieces.

Figura 91. Fichas técnicas Perfluoro elastomer-Terracota [Autor]

El mismo procedimiento que se llevó a cabo anteriormente se realizara en esta ocasión aplicando las propiedades del PLA/50% ARCILLA.

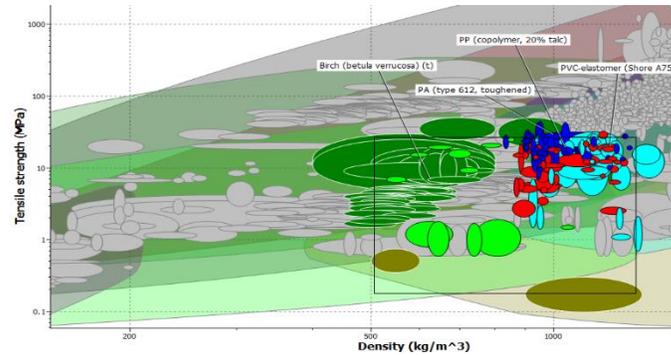


Figura 92. Esfuerzo a la tracción vs Densidad PLA/50% ARCILLA [Autor]

La resistencia a la tracción del PLA/50%ARCILLA, es comparable con materiales como PVC-elastomer, Polypropileno copolymer, Polyamide entre otros. En la Figura 93 se compara los módulos de Young, observe que los materiales analizados en la figura de esfuerzo a la tracción, aún permanecen entre los valores de rango del material PLA/50% ARCILLA.

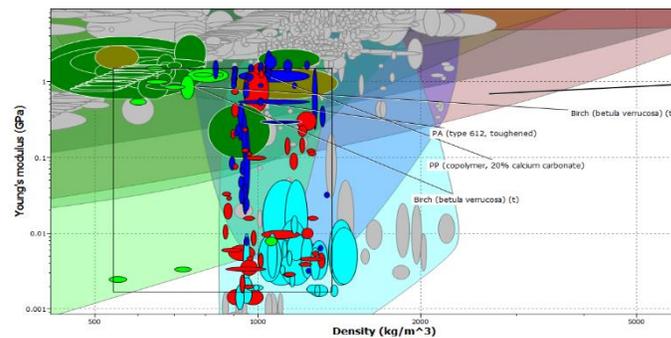


Figura 93. Módulo de Young vs Densidad PLA/50%ARCILLA [Autor]

Se presenta nuevamente la condición que los materiales presentados con las otras propiedades no estén en el rango del porcentaje de elongación, eso frustra la comparación y análisis del material.

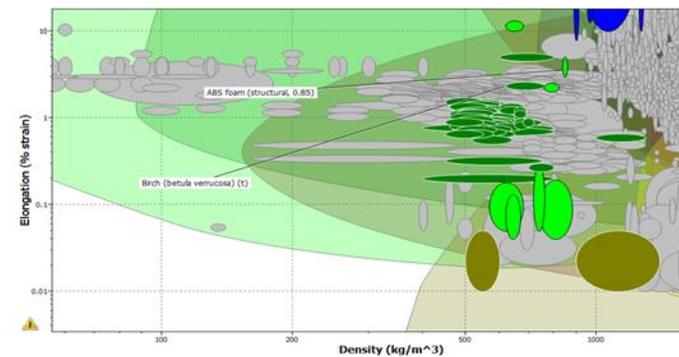


Figura 94. Porcentaje de Elongación vs Densidad PLA/50% ARCILLA [Autor]

Observe en la Figura 94 que el material que permanecen las tres comparaciones es el Betula verrucosa, se trata de un árbol conocido desde culturas arcaicas, con aplicaciones básicas. Entrando en detalle con las fichas técnicas presentadas de los materiales de las dos primeras propiedades demuestra que el material tiene aplicaciones de exposición superficial, además cabe resaltar que en diferentes materiales coincide con la aplicación de componentes médicos, dos materiales propios para resaltar son el Polypropileno copolymer, Polyamide.

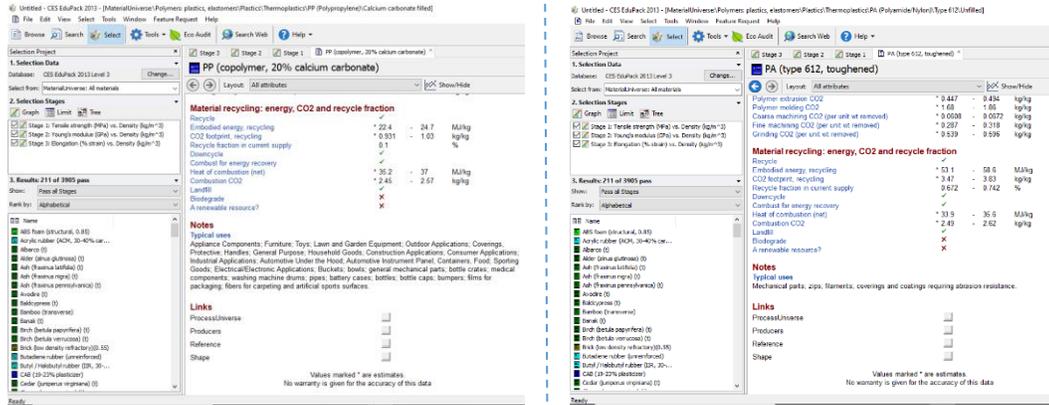


Figura 95. Fichas técnicas copolymer - polyamide [Autor]

Concluyendo el apartado no es evidente un material a reemplazar, pero queda claro las posibles aplicaciones de los materiales. Para entrar en más detalle se tuvo referencia de unas investigación con aplicaciones superficiales medicas [38]-[39], donde fue posible aplicar la impresión 3D, además el material usado en estas investigaciones fue el PLA un material resistente como queda claro en la investigación. Cabe la posibilidad de hacer un análisis estructural y observar la viabilidad del comportamiento del PLA/50%ARCILLA y PLA/80%COBRE en una aplicación de esta índole.

5.4 Simulación

Para dar inicio a la simulación de la aplicación seleccionada en la etapa de Ces EduPack, se empleó el software ANSYS (módulo Workbench-Static Structural). Para configurar la simulación se realizaron los siguientes pasos:

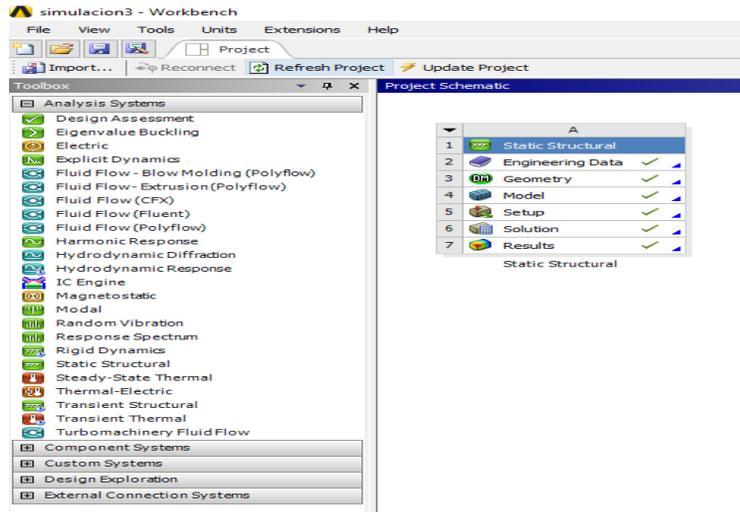


Figura 96. Módulo Workbench-Static Structural

1. Añadir el material ha Engineering Data como se muestra en la Figura 97, donde se configuraron las propiedades especificadas anteriormente analizadas. Los materiales seleccionados a simular fueron PLA/50%ARCILLA y PLA/80%COBRE.

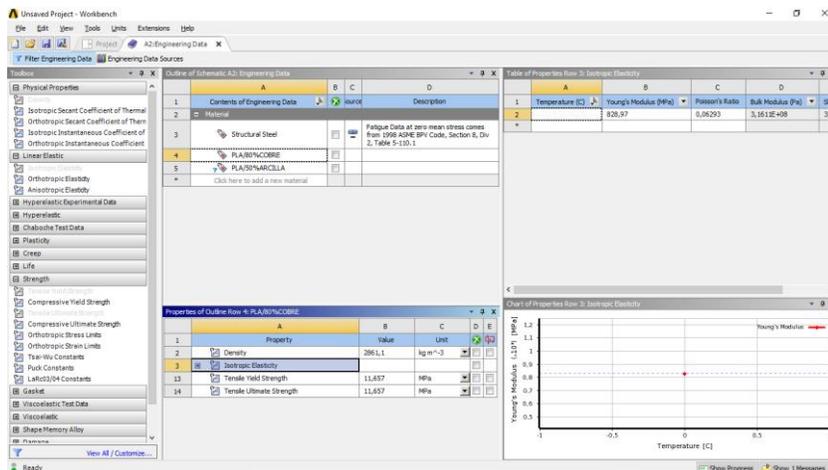


Figura 97. Configuración de datos del material [Autor]

2. Importar la geometría diseñada en Solidworks a design modeler.

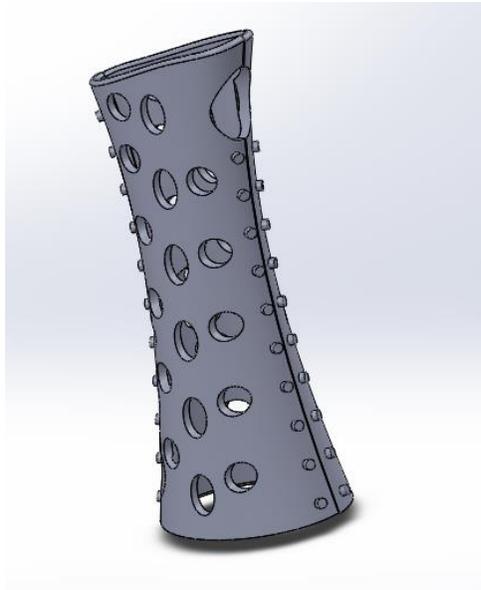


Figura 98. Diseño 3D Solidworks de Férula para brazo[Autor]

El diseño de la pieza se basó en modelos comerciales, con un diseño personalizado no se recalca las medidas ya que es una pieza que se adapta a una persona en específico, pero tiene apropiadamente 25 cm de longitud. El diseño es simple fácil de editar y adaptable con una estructura conforme a las medidas necesarias según el tipo de usuario.

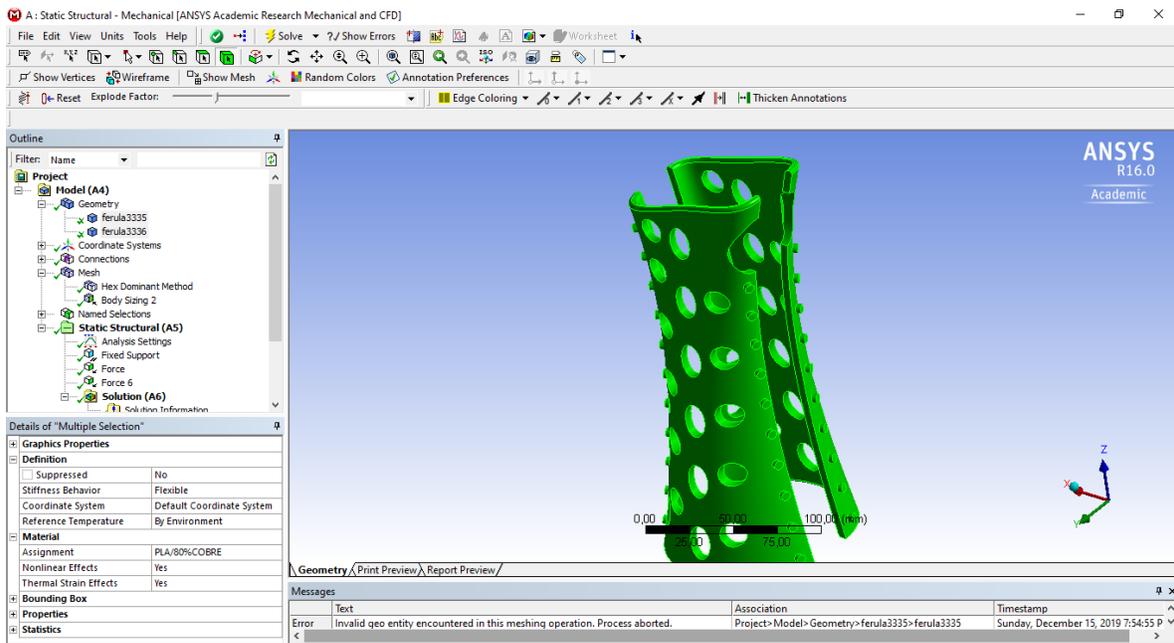


Figura 99. Pieza importada en design modeler[Autor]

3. En el ítem mecánico se configura la malla donde se seleccionó un tipo de mallado estructurado con elementos hexaédricos, se insertó un refinamiento con un tamaño de elemento de 2 mm, además, se le aplicó una carga de 1500N a compresión y se configuró el soporte fijo para evitar el desplazamiento de la pieza. Como resultados se hallan la deformación total, el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.

Tabla 14. Oblicuidad y calidad ortogonal [40]

Oblicuidad					
Excelente	Muy buena	Buena	Suficiente	Mala	Inapropiada
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00
Calidad ortogonal					
Inapropiada	Mala	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0.-0.001	0.001-0.15	0.15-0.20	0.20-0.70	0.70-0.95	0.95-1.00

Se recomienda mantener los valores representados en la Tabla 14 de calidad ortogonal y oblicuidad que mejoran el proceso del mallado. La calidad ortogonal debe estar en un valor aproximado de 0.95 y 1 y la oblicuidad o asimetría máxima menor de 0.25. El mallado al no estar comprendido en estos valores se dice que debe tener celdas o elementos defectuosos que puede conducir a resultados de simulación incorrectos [40].

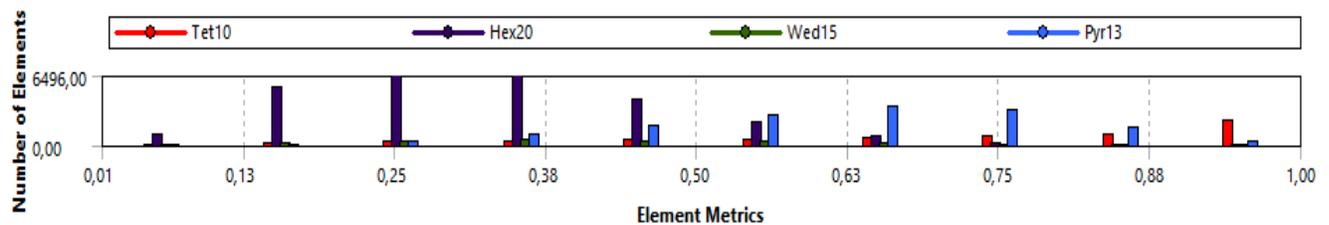


Figura 100. Oblicuidad del mallado [Autor]

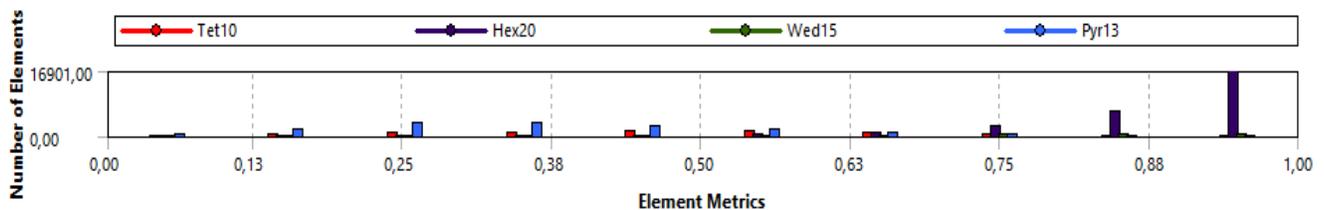


Figura 101. Calidad ortogonal del mallado [Autor]

En las Figura 100 y Figura 101 se evidencia la oblicuidad y calidad ortogonal del mallado que se empleó en la simulación. Observe los valores de oblicuidad que están en un rango bueno y el parámetro de calidad ortogonal que está en un rango muy bueno. A continuación, se muestra las figuras con el mallado de baja y alta calidad, siendo el mallado de alta calidad el seleccionado para la simulación. La cantidad de nodos aplicados a la pieza que fue de 191.292 nodos y 49.770 elementos.

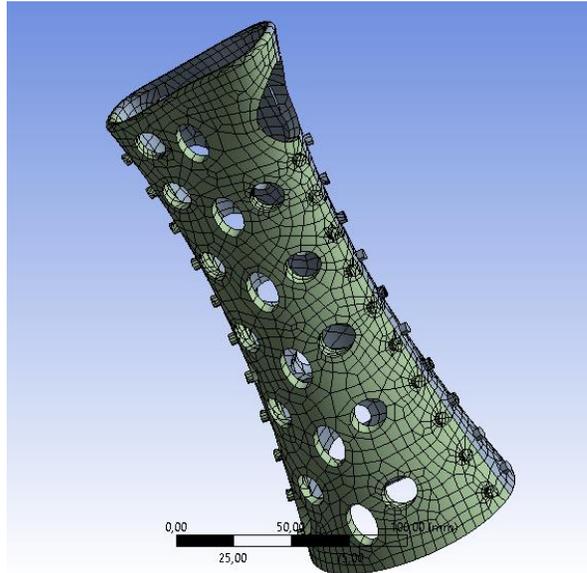


Figura 102. Baja calidad de malla [Autor]

A simple vista se observa el tamaño de la malla, la malla de baja calidad se identifica por tener un acabado pobre, en comparación con la de alta calidad que tiene un acabado fino donde abarca toda la pieza a simular.

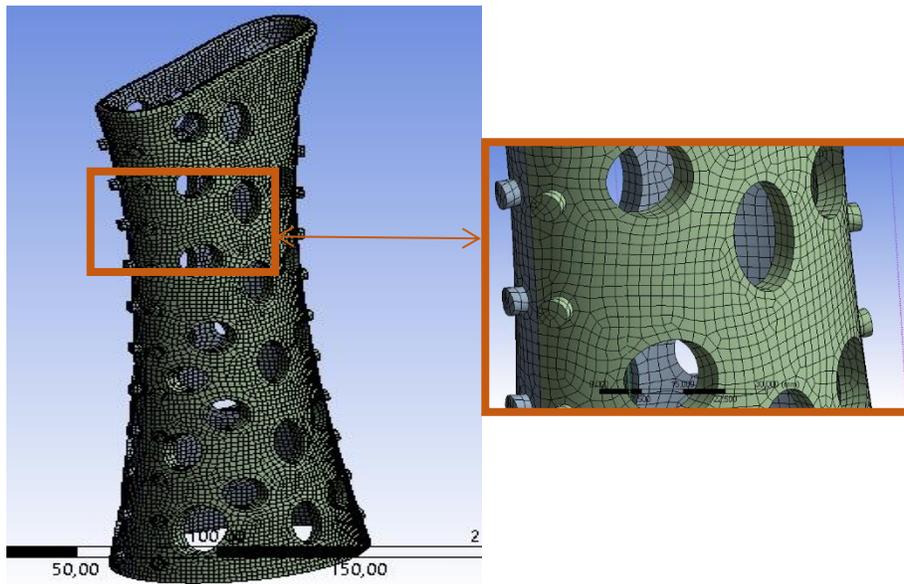


Figura 103. Alta calidad de malla (mallado seleccionado) [Autor]

El PLA/50% ARCILLA fue el primer material al cual se le realizó la simulación, es evidente en la Figura 104, que el material tiene un buen comportamiento donde su deformación máxima fue solo de 1.36 [mm] una deformación baja.

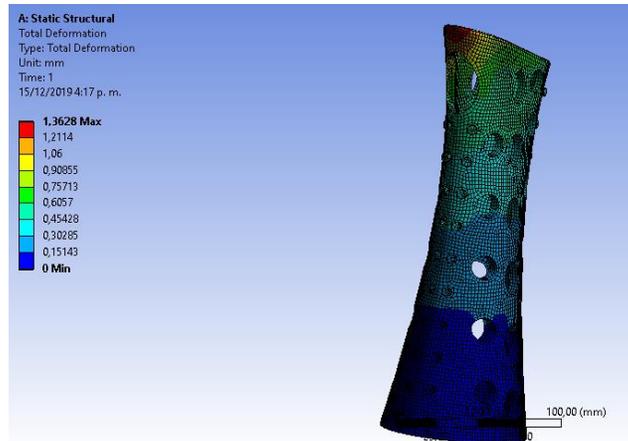


Figura 104. Simulación Deformación [mm] [Autor]

Una de las incógnitas más importantes dentro del diseño siempre es conocer el punto en el cual la pieza empieza a perder sus propiedades elásticas, justo antes de que empiece a fallar el material. En teoría todos los diseños mecánicos se conceptualizan para que funcionen dentro de la zona elástica del material, es decir una vez retiradas las condiciones a las que se encuentra sometido regresará a su forma original. El factor de seguridad, es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo es un número mayor que uno, que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos[41].

En la Figura 105 está representado el factor de seguridad de la pieza diseñada, donde su valor mínimo es de 1,49 el cual supera el rango permitido de 1, note en la figura que existe un punto donde se presenta este factor de seguridad y es en el área donde va posicionado el dedo pulgar, anteriormente se hizo modificaciones a la pieza para mejorar su factor y además para mejorar la calidad y acondicionamiento de la pieza de tal manera que fuese cómoda para el usuario. No se descarta la posibilidad de poder mejorar el diseño y superar ese factor de seguridad.

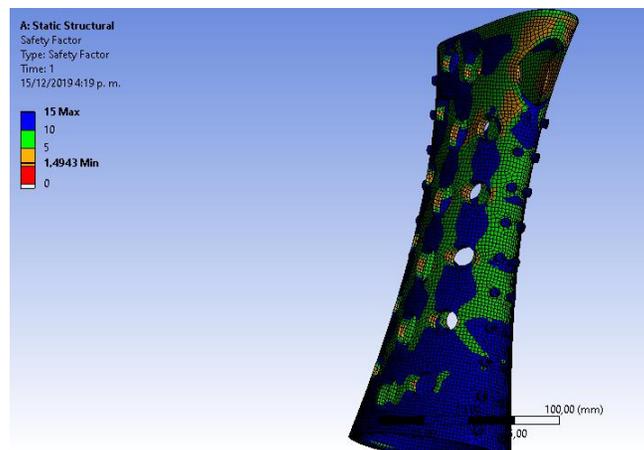


Figura 105. Factor de seguridad [Autor]

El criterio de von Mises, también llamado criterio de la máxima energía de distorsión, es un criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles, según el cual, el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción. El esfuerzo máximo de tracción del PLA/50%ARCILLA fue de 24,7578 [Mpa], observe en la Figura 106 que su esfuerzo equivalente de von mises en el punto máximo es de un valor de 16,568 [Mpa], lo cual revela que el material no va a fallar.

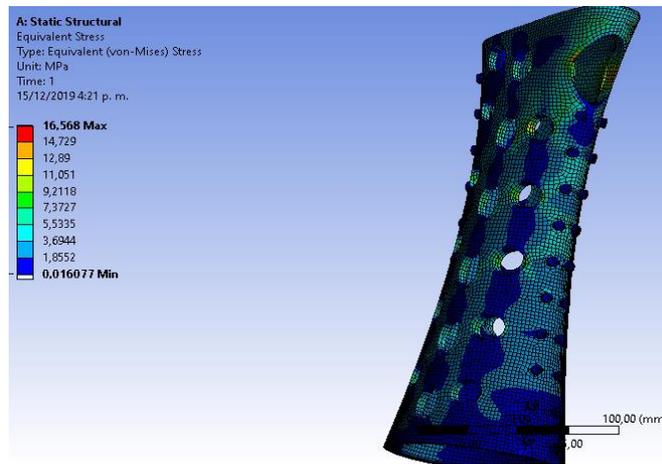


Figura 106. Esfuerzo equivalente de von mises[Autor]

El proceso de simulación fue igual para el material PLA/80%COBRE, pero los resultados no fueron prometedores. Su factor de seguridad estuvo por debajo de 1 y su esfuerzo equivalente de von mises supero su resistencia a la tracción máxima, lo cual indica que el material tiende a fallar.

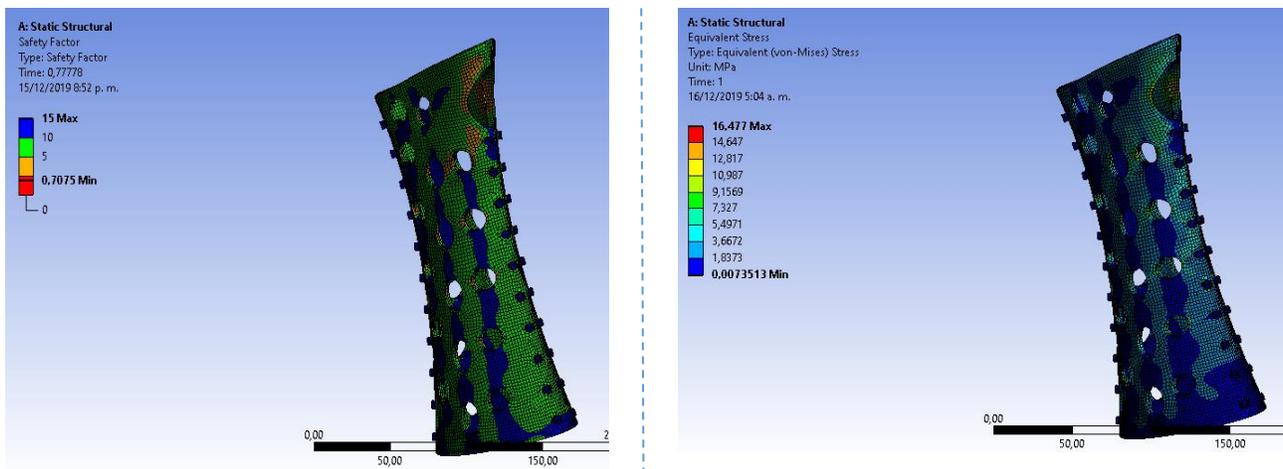


Figura 107. Factor de seguridad, esfuerzo equivalente de von mises del PLA/80%COBRE
 PLA/80%COBRE [Autor]

5.4.1 Diseños

Este apartado se escribe para presentar algunos de los diseños primarios de la férula para brazo, principalmente se tuvo en cuenta un prototipo basado en una tesis investigativa, pero se presentaron problemas de factores de comodidad, luego se mejoró el diseño adaptándolo a unas medias específicas fundamentados en prototipos comerciales. A continuación, se presenta los diferentes diseños estudiados. Se aclara que ninguno de estos fue el diseño final solo el presentado inicialmente en el apartado anterior.

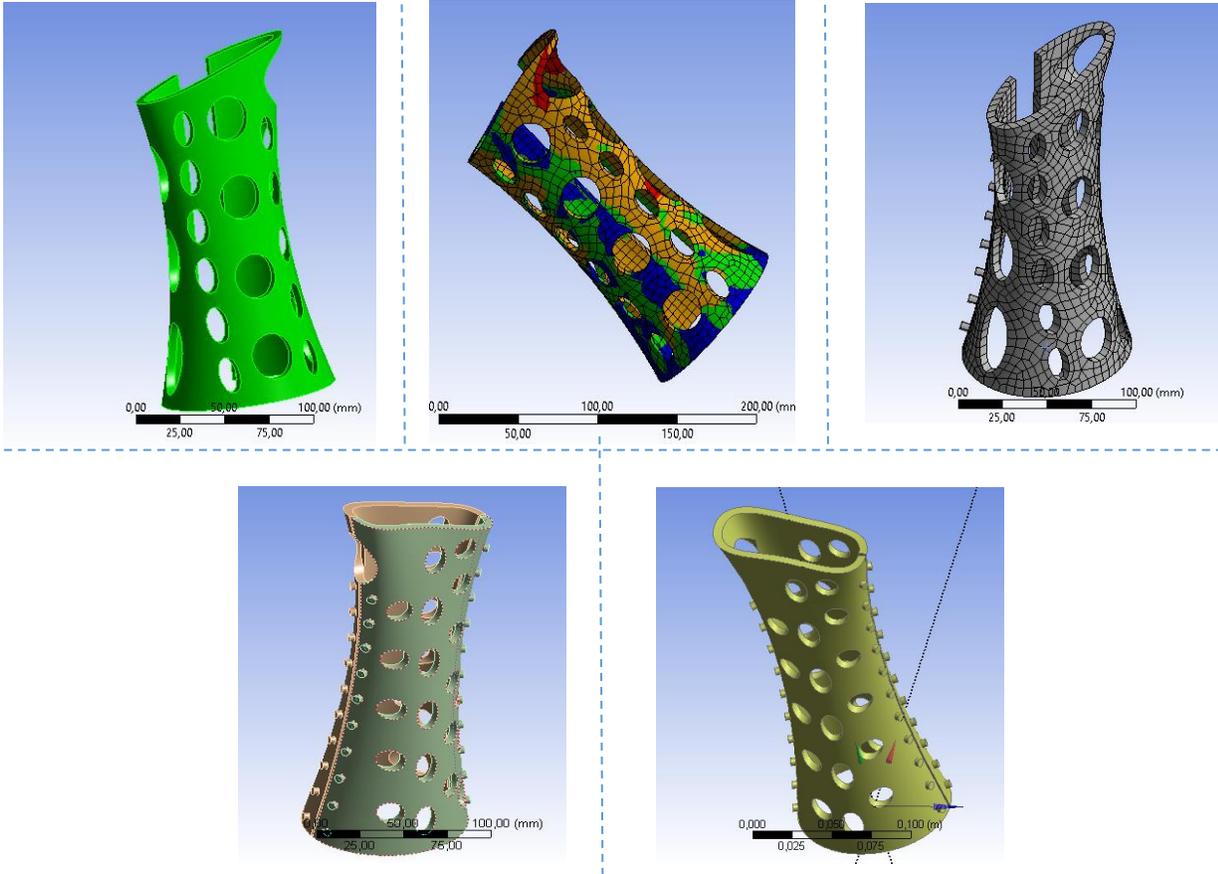


Figura 108. Diseños fallidos [Autor]

5.5 Prototipo

Para dar inicio al proceso de prototipado, el archivo CAD del diseño fue guardado como un archivo STL e importado al software encargado de generar el GCODE, Repetier Host - Slic3r. La impresora implementada fue la misma de la primera etapa de impresión, además los parámetros a utilizar en la impresión 3D-FDM del prototipo, coincidieron con los iniciales presentados.

Tabla 15. Parámetros impresión prototipo [Autor]

<i>Impresión 3D-FDM</i>	
<i>Relleno</i>	<i>Panal de abeja 3D</i>
<i>Porcentaje Relleno</i>	<i>80%</i>
<i>T. Cama [°C]</i>	<i>70</i>
<i>T. Extrusor [°C]</i>	
<i>Soporte</i>	<i>Si</i>
<i>Tiempo estimado impresión</i>	<i>29 h</i>
<i>Numero de capas</i>	<i>1725</i>
<i>Material necesario</i>	<i>112,5 m</i>
<i>Impresora</i>	<i>Laboratorio Unipamplona</i>
<i>Material</i>	<i>PLA/50%ARCILLA</i>
<i>Software</i>	<i>Repetier Host-Slic3r</i>

En la Tabla 15, se presenta algunas variaciones de la impresión anteriormente no tomadas, como el patrón y porcentaje de relleno, los cuales se cambió a panal de abeja 3D, que es un estilo de relleno resistente y bastante aplicado en un tamaño considerado de pieza, el porcentaje fue basado en disminuir el consumo de material. Se presenta de igual forma, el material total consumido y tiempo estimado de la impresión.

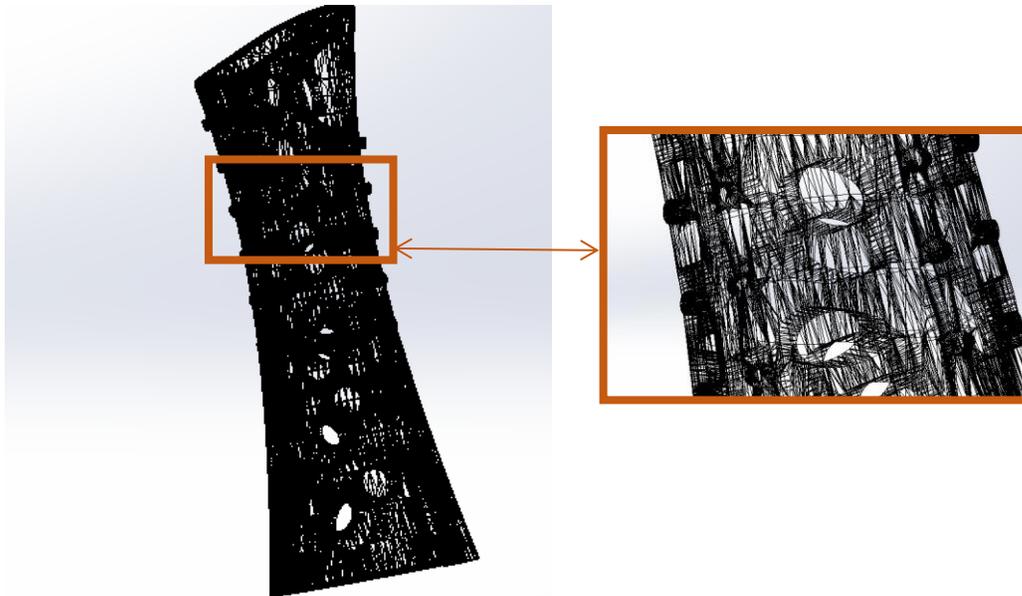


Figura 109. Archivo STL [Autor]

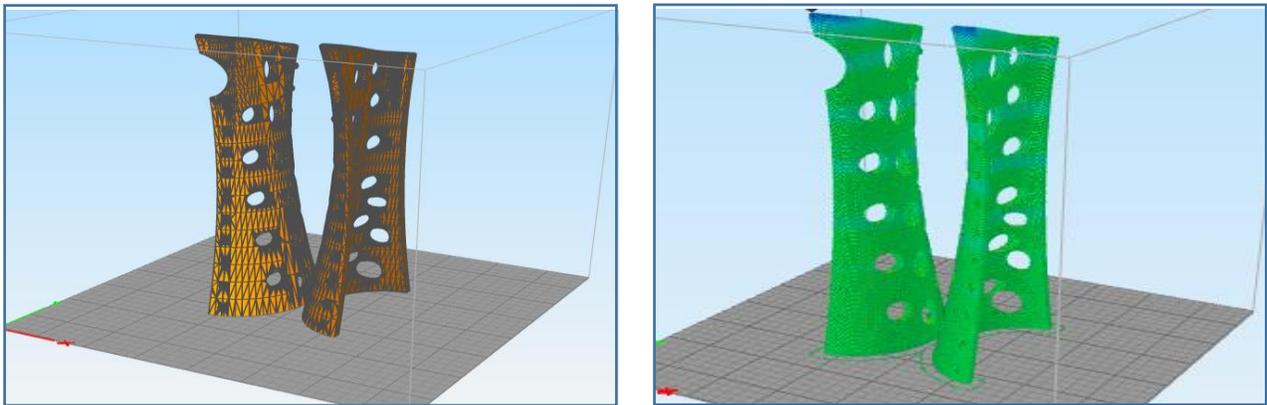


Figura 110. Prototipo exportado desde Solidworks en modelo 3D formato STL a programa Repetier Host [Autor]

En la Figura 110 se observa el procedimiento aplicado, donde una vez exportado desde Solidworks el modelo 3D en formato STL; se emplea el programa Repetier Host, el cual importa el archivo y lo ubica de acuerdo a una orientación por defecto, la ubicación fue modificada de forma vertical en contra una pieza de la otra, todo por razones de soporte.

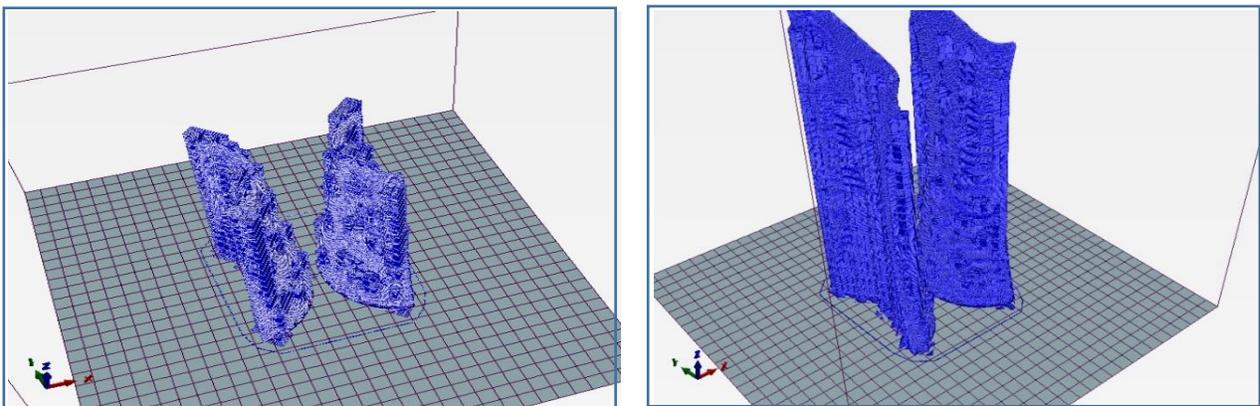


Figura 111. Simulación proceso de impresión prototipo [Autor]

Como se muestra en la Figura 111 este será el proceso final de impresión 3D-FDM, La estructura que se situaron como ESTRUCTURA de la pieza y evitar el desplazamiento de los filamentos

Capítulo 6

CONCLUSIONES

- ⌘ El estudio investigativo se fundamentó en la búsqueda de una nueva aplicación de los materiales compuestos tal vez capaces de reemplazar un material actual, pero el Ces EduPack demostró que las propiedades de módulo de Young y resistencia a la tracción son semejantes a unos materiales cosa que no pasa con su porcentaje de elongación en los materiales comparados.
- ⌘ Las técnicas de impresión 3D actualmente se posicionan entre los métodos favoritos de fabricación rápida, su facilidad de obtener piezas complejas es lo que más llama la atención, se observa como en diferentes países ya se están fabricando y comercializando materiales nuevos y con propiedades únicas, Colombia en la actualidad solo comercializa materiales en forma de filamento básicos sin refuerzos.
- ⌘ El PLA es muy usado en la industria de prototipado rápido por sus propiedades, pero hay algo muy importante que disminuye sus aplicaciones, su acabado superficial es pobre e irregular, en comparación de los materiales estudiados todos poseen acabado más fino.
- ⌘ Para cada método investigativo cambiar un factor en el ambiente puede significar un revelado diferente en sus resultados. Lo anterior se pudo comprobar al realizar el ensayo de la probeta número cinco en un día diferente al ensayado por las probetas 1-4, todas las probetas número cinco, de los diferentes materiales, se comportaron con una mayor resistencia a la tracción, se pudiese analizar más a profundidad que factor produce su aumento en propiedades, lo más probable sería factores de temperatura y presión del ambiente, pero no fue posible en este proyecto.
- ⌘ La investigación queda corta para poder abarcar completamente todas las propiedades de los materiales compuesto, se ve la necesidad de poder soportar una serie ensayos no contemplado en el alcance de la investigación que podría ayudar a profundizar en el comportamiento de cada material.
- ⌘ El PLA/50%ARCILLA fue el material aplicable en la férula de brazo. No se descarta los demás materiales para continuar con la búsqueda de aplicaciones ingenieriles, por la simple razón que cada uno de estos, demostró un comportamiento diferente el uno del otro en el análisis mediante microscopia electrónica de barrido SEM.

BIBLIOGRAFIA

- [1] William F. Smith, P. E. de Ingeniería, U. of C. Florida, P. Javad Hashemi, P. de I. Mecánica, and T. T. University, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, CUARTA. .
- [2] N. Laskar and U. Kumar, “Plastics and microplastics: A threat to environment,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 14, p. 100352, 2019.
- [3] N. Raddadi and F. Fava, “Biodegradation of oil-based plastics in the environment: Existing knowledge and needs of research and innovation,” *Sci. Total Environ.*, vol. 679, pp. 148–158, 2019.
- [4] H. Castellón, “Plásticos oxo-biodegradables vs. Plásticos biodegradables:¿ cuál es el camino?,” *Serv. ...*, p. 2, 2010.
- [5] S. Farah and D. G. Anderson, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,” *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367–392, Dec. 2016.
- [6] J. William D. Callister, D. of M. Engineering, T. U. of Utah, D. G. Rethwisch, and D. of C. and B. Engineering, “Materials Science and Engineering An Introduction,” *John Wiley Sons, Inc*, vol. 8, p. 124.
- [7] James Newell Rowan University, *Ciencia de materiales -Aplicaciones en ingeniería*, 1st ed. 2010.
- [8] J. William D. Callister, “Ciencias e ingeniería de los materiales,” *Editor. REVERTE S.A*, vol. 6, p. 457.
- [9] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, “ManufacturA, INGENIERÍA Y TecNOLOGÍA.”
- [10] J. Arias Pardilla, J. L. Vázquez Pico, and E. Morallón Núñez, “Síntesis y Caracterización de polímeros conductores basados en anilinas sustituidas y su aplicación en electrocatálisis,” *Univ. Alicant.*, vol. 1, no. 1, p. 344, 2007.
- [11] A. G. Gordo and N. M. Piris, *Ciencia de materiales para ingenieros*. 1995.
- [12] J. F. Shackelford, “Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros,” p. 870, 1998.
- [13] A. J. Albuquerque, “Optimización Y Caracterización De Piezas De Las Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas.,” *Tesis o Trab. grado*, p. 139, 2014.
- [14] A. Javier Del Medico Bravo Tutora and M. Milagros Laz Pavón, “Propiedades Mecánicas De Componentes Fabricados Mediante Modelado Por Deposición Fundida,” 2017.
- [15] C. D. E. I. Mecánica, “Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO,” 2019.
- [16] A. Ñauta and M. Vergara, “Simulación de Termofluidos de PLA Natural Y ABS en el Proceso de Impresión en 3D,” p. 104, 2017.
- [17] A. Guerrero Calle, “ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO DE PLA, ABS Y PLA/MLO,” p. 90, 2011.
- [18] K. Fayazbakhsh, M. Movahedi, and J. Kalman, “The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication,” *Mater. Today Commun.*, vol. 18, no. December 2018, pp. 140–148, 2019.
- [19] Z. Liu, Q. Lei, and S. Xing, “Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 3741–3751, 2019.
- [20] B. M. Rodríguez, “ESTUDIO SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN UNA IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA FDM Volumen,” 2017.
- [21] C. Lubombo and M. A. Huneault, “Effect of infill patterns on the mechanical performance of

- lightweight 3D-printed cellular PLA parts,” *Mater. Today Commun.*, vol. 17, pp. 214–228, 2018.
- [22] H. Wu, M. Sulkis, J. Driver, A. Saade-Castillo, A. Thompson, and J. H. Koo, “Multi-functional ULTEM™1010 composite filaments for additive manufacturing using Fused Filament Fabrication (FFF),” *Addit. Manuf.*, vol. 24, no. August, pp. 298–306, 2018.
- [23] L. Chen and X. Zhang, “Modification the surface quality and mechanical properties by laser polishing of Al/PLA part manufactured by fused deposition modeling,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 492, no. February, pp. 765–775, 2019.
- [24] M. Mohammadzadeh, A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, “3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, no. July, p. 107112, 2019.
- [25] M. Kariz, M. Sernek, M. Obućina, and M. K. Kuzman, “Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts,” *Mater. Today Commun.*, vol. 14, no. September 2017, pp. 135–140, 2018.
- [26] Y. Pyo *et al.*, “Design of a shape memory composite(SMC) using 4D printing technology,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 283, pp. 187–195, 2018.
- [27] V. Tambrallimath, R. Keshavamurthy, S. D, P. G. Koppad, and G. S. P. Kumar, “Thermal behavior of PC-ABS based graphene filled polymer nanocomposite synthesized by FDM process,” *Compos. Commun.*, vol. 15, no. July, pp. 129–134, 2019.
- [28] N. Singh, R. Singh, and I. P. S. Ahuja, “Recycling of polymer waste with SiC/Al₂O₃ reinforcement for rapid tooling applications,” *Mater. Today Commun.*, vol. 15, no. February, pp. 124–127, 2018.
- [29] R. M. Cardoso *et al.*, “3D printing for electroanalysis: From multiuse electrochemical cells to sensors,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 1033, pp. 49–57, 2018.
- [30] E. E. Reader, “FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS,” pp. 1–19, 2019.
- [31] Laura Arteaga Medina, “FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS,” *TRABAJO DE FIN DE GRADO*, 2015. [Online]. Available: <http://docplayer.es/10086498-Trabajo-de-fin-de-grado.html>. [Accessed: 23-May-2019].
- [32] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. Li, “A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, pp. 393–402, Apr. 2019.
- [33] A. Nugroho, R. Ardiansyah, L. Rusita, and I. L. Larasati, “Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1130, p. 012017, Nov. 2018.
- [34] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, and D. Bürger, “Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 124, pp. 88–100, Sep. 2017.
- [35] ASTM D-638., “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. D638 – 14, pp. 1–15, 2010.
- [36] “Microscopía de Barrido de Electrones (MEB) – Vicerrectoría de Investigaciones.” [Online]. Available: <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-meb/>. [Accessed: 04-Dec-2019].
- [37] “Introducción a los fundamentos del Método de los Elementos Finitos - ESSS.” [Online]. Available: https://www.esss.co/es/biblioteca-tecnica/curso-introduccion-fem/?gclid=Cj0KCQiAz53vBRCPARIsAPPsz8Uc3Fwrd-d3WIXfRyguCx_CQBmGa3CkQmxRvvIWfi20du7z-APysAaAq22EALw_wcB. [Accessed:

04-Dec-2019].

- [38] M. Fuentes Bordallo, “Diseño y ensayo de férulas personalizadas mediante impresión 3D.,” 2017.
- [39] J. Lopez and J. gutierrez Juian lofod, “Impacto económico de la impresión 3D en el sector médico-sanitario,” pp. 212–218, 2005.
- [40] D. A. E. Hincapi, “PARA INTERCAMBIO DE CALOR : CASO DE ESTUDIO a MESH INDEPENDENCE IN TWISTED TUBES FOR HEAT EXCHANGE : CASE STUDY,” no. 75, 2016.
- [41] U. N. D. E. Cajamarca, E. Académico, and P. D. E. Ingeniería, “Ingeniero civil,” pp. 1–118, 2014.

ANEXOS

datos técnicos PLA

Denominación química	Ácido poliláctico
Descripción	El filamento de PLA Ultimaker ofrece una experiencia de impresión 3D sencilla gracias a su fiabilidad y buena calidad superficial. Nuestro PLA está fabricado con materiales orgánicos y renovables. Es seguro, fácil de utilizar en la impresión y se adecua a una amplia gama de aplicaciones para usuarios nuevos y experimentados.
Características principales	El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de opciones de color disponibles.
Aplicaciones	Herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos y también métodos de fundición a la cera perdida para crear piezas de metal.
No adecuado para	Aplicaciones en contacto con alimentos e in vivo. Uso prolongado en exteriores o aplicaciones en las cuales la parte impresa está expuesta a temperaturas superiores a 50 °C.

Especificaciones del filamento

	<u>Valor</u>	<u>Método</u>
Diámetro	2,85 ± 0,10 mm	-
Desviación de redondez máxima	0,10 mm	-
Peso neto del filamento	350 g / 750 g	-
Longitud del filamento	~44 m / ~95 m	-

Información sobre el color

<u>Color</u>	<u>Código de color</u>
PLA verde	RAL 6018
PLA negro	RAL 9005
PLA plata metalizado	RAL 9006
PLA blanco	RAL 9010
PLA transparente	n.p.
PLA naranja	RAL 2008
PLA azul	RAL 5002
PLA magenta	RAL 4010
PLA rojo	RAL 3020
PLA amarillo	RAL 1003
PLA blanco nacarado	RAL 1013

Propiedades mecánicas (*)

Moldeo por inyección

Impresión 3D

	<u>Valor típico</u>	<u>Método de ensayo</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método de ensayo</u>
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro

Propiedades térmicas

Valor típico

Método de ensayo

Índice de fluidez (MFR)	6,09 g/10 min	ISO 1133 (210 °C, 2,16 kg)
Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa	-	-
Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa	-	-
Transición vítrea	~60 °C	ISO 11357
Coefficiente de expansión térmica	-	-
Temperatura de fusión	145-160 °C	ISO 11357
Contracción térmica	-	-

Otras propiedades

Valor típico

Método de ensayo

Gravedad específica	1,24	ASTM D1505
Clasificación de llama	-	-

(*) Ver las notas.

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 1 June 2016



MetalFil™ - Classic Copper

1. Identification of the substance/preparation and of the company

- 1.1 Trade name: MetalFil™ - Classic Copper
- 1.2 Chemical name: Highly Copper filled PLA based polymer blend
- 1.3 Typical use of the material: Monofilament for FFF/FDM technology based 3D printing
- 1.4 Identification of the company: Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands
- Phone: +31 (0)85 002 0881
- Emergency phone number: +31 (0)30 274 8888**

2. Identification of the substance/preparation and of the company

- 2.1 Risk advise to man and the environment: No risk exists to the health of users if the product is handled and processed properly.
- 2.2 Classification of the substance or mixture: Classification according to Directive 1272/2008/EEC.
- **Aquatic Acute 1:** H400 Very toxic to aquatic life.
 - **Aquatic Chronic 3:** H412 Harmful to aquatic life with long lasting effects.
- 2.3 Label elements
- Labelling according to Directive 1272/2008/EEC.**
The substance is classified and labelled according to the CLP regulation.

Hazard pictograms: GHS09



Signal word: Warning

Hazard statements

- H400 Very toxic to aquatic life.
- H412 Harmful to aquatic life with long lasting effects.

Precautionary statements

- **P273:** Avoid release to the environment.
- **P391:** Collect spillage.
- **P501:** Dispose of contents/container in accordance with local/regional/national/international regulations.

- 2.4 Special advice on hazards: Danger of burns while handling the heated or molten product. Inhalation of dust or fumes leads to irritation of respiratory system.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 1 June 2016



3. Composition / information on ingredients

- 3.1 Chemical nature: Blend of PLA based polymers filled with copper powder enhanced for 3D printing
- 3.2 CAS number: **Copper:** 7440-50-8
PolyLactic Acid: 9051-89-2
- 3.3 Additional information: None of the substances, named in the Candidate list art. 59 (1,10) of the REACH regulation EC no. 1907/2006 has been used in a concentration > 0,1%.

4. First-aid measures

- 4.1 If inhaled: After inhalation of decomposition products, gases or dust, bring the affected person to a source of fresh air and keep calm. Contact a physician in case of discomfort.
- 4.2 On skin contact: In case of contact with melted material, immediately cool the skin with plenty of cold running water. Removal of adhering to skin polymer, or burns caused by molten material require hospital treatment.
- 4.3 On contact with eyes: In case of contact with eyes, rinse open eyes thoroughly with water. If irritation develops, seek immediate medical attention.
- 4.4 On ingestion: Rinse mouth with water and induce vomiting immediately. Seek immediate medical attention. If a person vomits when lying on his back, place him in the recovery position.
- 4.5 Note to the physician: Treat symptomatically

5. Firefighting measures

- 5.1 Suitable extinguishing media: Dry chemical extinguishing media, foam, CO₂, water spray jet.
- 5.1.1 Unsuitable extinguishing media: High volume water jet.
- 5.2 Specific hazards: Do not use a solid water stream as it may scatter and spread fire. Exposure to decomposition products may be a hazard to health. In case of fire possible decomposition products are, Carbon oxide's
- 5.3 Special protective equipment: Full protective clothing and self-contained breathing apparatus.
- 5.4 Further information: Fine dust dispersed in air may ignite. Risk of ignition followed by flame propagation or secondary explosions shall be prevented by avoiding accumulation of dust.
Standard procedure for chemical fires. Use extinguishing measures that are appropriate to local circumstances and the surrounding environment. In the event of fire and/or explosion do not breathe fumes.
Dispose of fire debris and contaminated extinguishing water in accordance with official regulations.

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 1 June 2016



6. Accidental Release Measures

- 6.1 Personal precautions: Use personal protective equipment/clothing (see Section 8). Avoid eye contact and dust formation and remove all sources of ignition. Sweep up to prevent slipping hazard.
- 6.2 Environmental precautions: Prevent entry into drainage systems, or surface water.
- 6.3 Methods for cleaning up: Sweep/shovel into suitable container for disposal. Avoid raising dust and ensure adequate ventilation. Clean contaminated surface thoroughly.

7. Handling and storage

- 7.1 Handling: Handle in a well ventilated area. Install local exhaust at 3D printers area is recommended when many printers are operated at once. Avoid contact with heated or molten product. Use personal protective equipment (see Section 8). Avoid dust formation and electrostatic charge. Keep away from fire ignition sources.
- 7.2 Storage: Protect from water, moisture and direct sunlight. Store material in dry rooms and keep material in closed packaging/container with desiccant when not in use. Store at ambient temperatures. Avoid all sources of ignition. Keep away from food, drink and animal feedingstuffs.
- 7.3 Precautions: No special precautions required.
- 7.4 Specific end use(s): Primarily used for 3D printing.

8. Exposure controls / personal protection

- 8.1 Occupational exposure limits: Given suitable ventilation it can be that the threshold limits will not be reached.
- 8.2 Exposure controls: Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. Avoid electrostatic charge by use of grounding cables. In the case of dust or aerosol formation use respirator with an approved filter. Half mask with a particle filter P2 (EN 143).
- 8.3 Personal protective equipment
- 8.3.1 Hand protection: Wear heat protection gloves, preferably cotton or leather, when handling hot molten product.
- 8.3.2 Eye protection: Wear protective glasses, preferable with side-shields.
- 8.3.3 Skin and body protection: Wear (protective) clothing to avoid direct exposure of skin to hot molten product when handling.
- 8.3.4 Safety and hygiene measures: Avoid contact of hot molten material to skin. Avoid inhalation of dust, mists and vapours. Eye wash fountains and safety showers must be easily accessible. Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. No eating or drinking during working.
- 8.4 Environmental exposure controls: Prevent entry into drainage systems, or surface water.

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 1 June 2016



9. Physical and chemical properties

9.1 Form:	Filament
9.2 Colour:	Copper
9.3 Odour:	Neutral
9.4 Melting point:	150-170° C
9.5 Auto-ignition temperature:	No specified
9.6 Explosions limit:	Not specified
9.7 Density:	± 3.40 g/cc
9.8 Solubility in water:	Insoluble

10. Stability and reactivity

10.1 Stability:	Product is stable at recommended storage conditions.
10.2 Conditions to avoid:	Avoid extreme heat, moisture, static discharges and all other sources of ignition.
10.3 Substances to avoid:	Strong oxidizing agents.
10.4 Hazardous reactions:	The product is chemically stable.
10.4.1 Hazardous decomposition products:	Dangerous/toxic metal fumes and other gaseous products of degradation can be given off if the product is greatly overheated.

11. Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects:	Toxicological data has not been determined for this product. Information is based on similar products.
11.1.1 Acute toxicity	
Inhalation:	No data available, but not expected.
Ingestion:	No data available, but not expected.
Skin contact:	No data available, but not expected.
Eye contact:	No data available, but not expected.
11.1.2 Irritation	
Skin:	No data available, but not expected to be irritating.
Eye:	No data available, but not expected to be irritating.
11.1.3 Sensitization:	Not expected to be a skin sensitizer.
11.1.4 Repeated dose toxicity:	Negative.
11.1.5 Carcinogenicity:	No data available, but not expected.
11.1.6 Mutagenicity:	No data available, but not expected.
11.1.7 Toxicity for reproduction:	No data available, but not expected.
11.2 Other information:	Based on our state of knowledge and experience no injurious health effects are expected if product is properly handled for the designated use.

12. Ecological information

12.1 Information on eco-toxicity:	No ecological toxicity data has been generated for this product. There are no test results available and information is based on similar products.
12.1.1 Ecological toxicity effects:	No negative ecological effects are known at the present state of knowledge.
12.2 Mobility in soil:	No data available, but expected to be insoluble in soil.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 1 June 2016



12.3 Persistence and degradability: No data available concerning biodegradation and elimination, but expected to be difficult to degrade.

12.4 Bioaccumulation potential: No data available, but product is expected not to be readily bioavailable due to its consistency and insolubility in water.

13. Disposal considerations

13.1 Product: Generation of waste should be minimized, check possibility for recycling. Waste product can be incinerated or dumped together with domestic waste in compliance with local authority requirements.

13.2 Packaging: Packaging material has to be emptied completely and disposed in accordance with the regulations. Packaging can be recycled if not contaminated.

14. Transport information

14.1 International Air Transportation Association Classification (IATA): This product is not classified as hazardous.

14.2 International Maritime Organization (IMDG): This product is not classified as hazardous.

14.3 14.3 UN, IMO, ADR/RID, ICAO Code: This product is not classified as hazardous.

15. Regulatory information

15.1 EU / National regulations: This product does not require a hazard warning label in accordance with EC Directives.
EU regulation (EC) 1907/2006 (Reach) ANNEX XVII (restrictions) Not applicable.

16. Other information

Company name: Formfutura VOF

Additional data: In addition to the information given in this Material Safety Data Sheet (MSDS) we refer to the products specific Technical Data Sheet (TDS).

Disclaimer: The information given in the Material Safety Data Sheet only applies to the described product in connection with its appropriate use. All information is based on the latest state of our knowledge. In particular, it describes our product under the aspect of possible hazards and pertaining safety measures. The information does not constitute any guarantee of specific product and/or quality properties. The information given in this Material Safety Data Sheet is not required according to article 31 and Annex II of Regulation (EC) No.1907/2006. It merely serves the purpose of providing sufficient information on a voluntary basis to ensure safe use of the compound/product. There is no obligation on the part of Formfutura to revise this document.

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 16 March 2017



StoneFil™

1. Identification of the substance/preparation and of the company

- 1.1 Trade name: StoneFil™
- 1.2 Chemical name: PolyLactic Acid (PLA) based polymer blend
- 1.3 Typical use of the material: Monofilament for FFF/FDM technology based 3D printing
- 1.4 Identification of the company: Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

Phone: +31 (0)85 002 0881

Emergency phone number: +31 (0)30 274 8888

2. Hazards identification

- 2.1 Risk advise to man and the environment: No risk exists to the health of users if the product is handled and processed properly.
- 2.2 Classification of the substance or mixture: Not classified as dangerous according to Directive 67/548/EEC and EC/1272/2008 (CLP)
- 2.3 Special advice on hazards: Danger of burns while handling the heated or molten product.

3. Composition / information on ingredients

- 3.1 Chemical nature: Blend of PLA based polymers gravimetrically filled with 50% stone powders and additional additives enhanced for 3D printing.
- 3.2 CAS number: -
- 3.3 Additional information: No harmful substances used.

4. First-aid measures

- 4.1 If inhaled: After inhalation of decomposition products, gases or dust, bring the affected person to a source of fresh air and keep calm. Contact a physician in case of discomfort.
- 4.2 On skin contact: In case of contact with melted material, immediately cool the skin with plenty of cold running water. Removal of adhering to skin polymer, or burns caused by molten material require hospital treatment.
- 4.3 On contact with eyes: In case of contact with eyes, rinse open eyes thoroughly with water. If irritation develops, seek immediate medical attention.
- 4.4 On ingestion: No effects known. Rinse mouth with water and then drink plenty of water. Seek medical attention if difficulties or discomfort occur.
- 4.5 Note to the physician: Treat symptomatically

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 16 March 2017



5. Firefighting measures

- 5.1 Suitable extinguishing media: Dry chemical powder, water, or CO₂.
- 5.2 Specific hazards: Carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), and hydrocarbons during incomplete combustion. The substances mentioned can be released at highly elevated temperatures and in case of fire.
- 5.3 Special protective equipment: Full protective clothing and self-contained breathing apparatus.
- 5.4 Further information: Fine dust dispersed in air may ignite. Risk of ignition followed by flame propagation or secondary explosions shall be prevented by avoiding accumulation of dust. Dispose of fire debris and contaminated extinguishing water in accordance with official regulations.

6. Accidental Release Measures

- 6.1 Personal precautions: Use personal protective equipment/clothing (see Section 8). Avoid eye contact and dust formation and remove all sources of ignition. Sweep up to prevent slipping hazard.
- 6.2 Environmental precautions: Prevent entry into drainage systems, or surface water.
- 6.3 Methods for cleaning up: Sweep/shovel into suitable container for disposal. Avoid raising dust and ensure adequate ventilation.

7. Handling and storage

- 7.1 Handling: Handle in a well ventilated area. Install local exhaust at 3D printers area is recommended when many printers are operated at once. Avoid contact with heated or molten product. Use personal protective equipment (see Section 8). Avoid dust formation and electrostatic charge. Keep away from fire ignition sources.
- 7.2 Storage: Protect from water, moisture and direct sunlight. Store material in dry rooms and keep material in closed packaging/container with desiccant when not in use. Store at ambient temperatures. Avoid all sources of ignition.
- 7.3 Precautions: No special precautions required.
- 7.4 Specific end use(s): Primarily used for 3D printing.

8. Exposure controls / personal protection

- 8.1 Occupational exposure limits: Given suitable ventilation it can be that the threshold limits will not be reached.
- 8.2 Exposure controls: Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. Avoid electrostatic charge by use of grounding cables.
- 8.3 Personal protective equipment
- 8.3.1 Hand protection: Wear heat protection gloves, preferably cotton or leather, when handling hot molten product.
- 8.3.2 Eye protection: Wear protective glasses, preferable with side-shields.
- 8.3.3 Skin and body protection: Wear (protective) clothing to avoid direct exposure of skin to hot molten product when handling.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 16 March 2017



8.3.4 Safety and hygiene measures: Avoid contact of hot molten material to skin. Avoid inhalation of dust, mists and vapours. Eye wash fountains and safety showers must be easily accessible. Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. No eating or drinking during working.

8.4 Environmental exposure controls: Prevent entry into drainage systems, or surface water.

9. Physical and chemical properties

9.1 Form: Granules / Filament
9.2 Colour: Natural
9.3 Odour: Almost odourless
9.4 Melting point/range: 120 °C - 170 °C
9.5 Auto-ignition temperature: Not specified
9.6 Explosions limit: Not specified
9.7 Density: 1.7 g/cc
9.8 Solubility in water: Insoluble
9.9 Decomposition temperature: > 280°C

10. Stability and reactivity

10.1 Stability: Product is stable at recommended storage conditions.
10.2 Conditions to avoid: Avoid extreme heat and all sources of ignition. Thermal decomposition > 280°C.
10.3 Substances to avoid: Strong acids and peroxides.
10.4 Hazardous reactions: The product is chemically stable.
10.4.1 Hazardous decomposition products: None under normal handling and storage conditions.

11. Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects: Toxicological data has not been determined for this product. Information is based on similar products.

11.1.1 Acute toxicity

Inhalation:	No data available, but not expected.
Ingestion:	After ingestion stomach pain or nausea are possible.
Skin contact:	No data available, but not expected.
Eye contact:	No data available, but not expected.

11.1.2 Irritation

Skin:	Non irritating.
Eye:	Non irritating.

11.1.3 Sensitization: Not expected to be a skin sensitizer.
11.1.4 Repeated dose toxicity: Not expected to cause toxic effects.
11.1.5 Carcinogenicity: No data available, but not expected.
11.1.6 Mutagenicity: No data available, but not expected.
11.1.7 Toxicity for reproduction: No data available, but not expected.

11.2 Other information: Based on our state of knowledge and experience no injurious health effects are expected if product is properly handled for the designated use.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 16 March 2017



12. Ecological information

- 12.1 Information on eco-toxicity: No ecological toxicity data has been generated for this product. There are no test results available and information is based on similar products.
- 12.1.1 Ecological toxicity effects: No negative ecological effects are known at the present state of knowledge.
- 12.2 Mobility in soil: The product is essentially insoluble in water.
The product has low mobility in soil.
- 12.3 Persistence and degradability: This water-insoluble polymeric solid is difficult to decompose.
- 12.4 Bioaccumulation potential: The product will not be readily bioavailable due to its consistency and insolubility in water.

13. Disposal considerations

- 13.1 Product: Generation of waste should be minimized, check possibility for recycling. Waste product can be incinerated or dumped together with domestic waste in compliance with local authority requirements.
- 13.2 Packaging: Packaging material has to be emptied completely and disposed in accordance with the regulations. Packaging can be recycled if not contaminated.

14. Transport information

- 14.1 International Air Transportation Association Classification (IATA): This product is not classified as hazardous.
- 14.2 International Maritime Organization (IMDG): This product is not classified as hazardous.
- 14.3 14.3 UN, IMO, ADR/RID, ICAO Code: This product is not classified as hazardous.

15. Regulatory information

- 15.1 EU / National regulations: This product does not require a hazard warning label in accordance with EC Directives.

16. Other information

Company name: Formfutura VOF

Additional data: In addition to the information given in this Material Safety Data Sheet (MSDS) we refer to the products specific Technical Data Sheet (TDS).

Disclaimer: The information given in the Material Safety Data Sheet only applies to the described product in connection with its appropriate use. All information is based on the latest state of our knowledge. In particular, it describes our product under the aspect of possible hazards and pertaining safety measures. The information does not constitute any guarantee of specific product and/or quality properties. The information given in this Material Safety Data Sheet is not required according to article 31 and Annex II of Regulation (EC) No.1907/2006. It merely serves the purpose of providing sufficient information on a voluntary basis to ensure safe use of the compound/product. There is no obligation on the part of Formfutura to revise this document.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 7 January 2016



EasyWood™

1. Identification of the substance/preparation and of the company

- 1.1 Trade name: EasyWood™
- 1.2 Chemical name: PolyLactic Acid (PLA) based polymer blend
- 1.3 Typical use of the material: Monofilament for FFF/FDM technology based 3D printing
- 1.4 Identification of the company: Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands
- Phone: +31 (0)85 002 0881
- Emergency phone number: +31 (0)30 274 8888**

2. Identification of the substance/preparation and of the company

- 2.1 Risk advise to man and the environment: No risk exists to the health of users if the product is handled and processed properly.
- 2.2 Classification of the substance or mixture: Not classified as dangerous according to Directive 67/548/EEC
- 2.3 Special advice on hazards: Danger of burns while handling the heated or molten product.

3. Composition / information on ingredients

- 3.1 Chemical nature: Blend of PLA based polymers filled with 30% to 40% wood fibres and additional additives enhanced for 3D printing.
- 3.2 CAS number: 9051-89-2
- 3.3 Additional information: No harmful substances used.

4. First-aid measures

- 4.1 If inhaled: After inhalation of decomposition products, gases or dust, bring the affected person to a source of fresh air and keep calm. Contact a physician in case of discomfort.
- 4.2 On skin contact: In case of contact with melted material, immediately cool the skin with plenty of cold running water. Removal of adhering to skin polymer, or burns caused by molten material require hospital treatment.
- 4.3 On contact with eyes: In case of contact with eyes, rinse open eyes thoroughly with water. If irritation develops, seek immediate medical attention.
- 4.4 On ingestion: No effects known. Rinse mouth with water and then drink plenty of water. Seek medical attention if difficulties or discomfort occur.
- 4.5 Note to the physician: Treat symptomatically

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 7 January 2016



5. Firefighting measures

- 5.1 Suitable extinguishing media: Dry extinguishing media, water, or CO₂.
- 5.2 Specific hazards: Carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), and hydrocarbons during incomplete combustion. The substances mentioned can be released at highly elevated temperatures and in case of fire.
- 5.3 Special protective equipment: Full protective clothing and self-contained breathing apparatus.
- 5.4 Further information: Fine dust dispersed in air may ignite. Risk of ignition followed by flame propagation or secondary explosions shall be prevented by avoiding accumulation of dust.
Dispose of fire debris and contaminated extinguishing water in accordance with official regulations.

6. Accidental Release Measures

- 6.1 Personal precautions: Use personal protective equipment/clothing (see Section 8). Avoid eye contact and dust formation and remove all sources of ignition. Sweep up to prevent slipping hazard.
- 6.2 Environmental precautions: Prevent entry into drainage systems, or surface water.
- 6.3 Methods for cleaning up: Sweep/shovel into suitable container for disposal.
Avoid raising dust and ensure adequate ventilation.

7. Handling and storage

- 7.1 Handling: Handle in a well ventilated area. Install local exhaust at 3D printers area is recommended when many printers are operated at once. Avoid contact with heated or molten product. Use personal protective equipment (see Section 8). Avoid dust formation and electrostatic charge. Keep away from fire ignition sources.
- 7.2 Storage: Protect from water, moisture and direct sunlight. Store material in dry rooms and keep material in closed packaging/container with desiccant when not in use. Store at ambient temperatures. Avoid all sources of ignition.
- 7.3 Precautions: No special precautions required.
- 7.4 Specific end use(s): Primarily used for 3D printing.

8. Exposure controls / personal protection

- 8.1 Occupational exposure limits: Given suitable ventilation it can be that the threshold limits will not be reached.
- 8.2 Exposure controls: Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. Avoid electrostatic charge by use of grounding cables.
- 8.3 Personal protective equipment
- 8.3.1 Hand protection: Wear heat protection gloves, preferably cotton or leather, when handling hot molten product.
- 8.3.2 Eye protection: Wear protective glasses, preferable with side-shields.
- 8.3.3 Skin and body protection: Wear (protective) clothing to avoid direct exposure of skin to hot molten product when handling.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 7 January 2016



8.3.4 Safety and hygiene measures: Avoid contact of hot molten material to skin. Avoid inhalation of dust, mists and vapours. Eye wash fountains and safety showers must be easily accessible. Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. No eating or drinking during working.

8.4 Environmental exposure controls: Prevent entry into drainage systems, or surface water.

9. Physical and chemical properties

9.1 Form: Granules
9.2 Colour: Natural
9.3 Odour: Almost odourless
9.4 Melting point/range: 140 °C - 150 °C
9.5 Auto-ignition temperature: Not self-igniting / Not highly flammable
9.6 Explosions limit: Not specified
9.7 Density: 1.2 g/cc
9.8 Solubility in water: Insoluble

10. Stability and reactivity

10.1 Stability: Product is stable at recommended storage conditions.
10.2 Conditions to avoid: Avoid extreme heat and all sources of ignition. Thermal decomposition > 230°C.
10.3 Substances to avoid: Strong oxidizing agents.
10.4 Hazardous reactions: The product is chemically stable.
10.4.1 Hazardous decomposition products: Carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), tetrahydrofuran, and low molecular weight oligomers.

11. Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects: Toxicological data has not been determined for this product. Information is based on similar products.

11.1.1 Acute toxicity

Inhalation:	No data available, but not expected.
Ingestion:	After ingestion stomach pain or nausea are possible.
Skin contact:	No data available, but not expected.
Eye contact:	No data available, but not expected.

11.1.2 Irritation

Skin:	Dust can cause irritation of eyes, respiratory organs and skin.
Eye:	Dust can cause irritation of eyes, respiratory organs and skin.

11.1.3 Sensitization: Not expected to be a skin sensitizer.
11.1.4 Repeated dose toxicity: Not expected to cause toxic effects.
11.1.5 Carcinogenicity: No data available, but not expected.
11.1.6 Mutagenicity: No data available, but not expected.
11.1.7 Toxicity for reproduction: No data available, but not expected.

11.2 Other information: Based on our state of knowledge and experience no injurious health effects are expected if product is properly handled for the designated use.

Material Safety Data Sheet

According to EU Regulation No. 1907/2006

Issued on: 7 January 2016



12. Ecological information

- 12.1 Information on eco-toxicity: No ecological toxicity data has been generated for this product. There are no test results available and information is based on similar products.
- 12.1.1 Ecological toxicity effects: No negative ecological effects are known at the present state of knowledge.
- 12.2 Mobility in soil: The product is essentially insoluble in water. The product has low mobility in soil.
- 12.3 Persistence and degradability: Product is biodegradable.
- 12.4 Bioaccumulation potential: The product will not be readily bioavailable due to its consistency and insolubility in water.

13. Disposal considerations

- 13.1 Product: Generation of waste should be minimized, check possibility for recycling. Waste product can be incinerated or dumped together with domestic waste in compliance with local authority requirements.
- 13.2 Packaging: Packaging material has to be emptied completely and disposed in accordance with the regulations. Packaging can be recycled if not contaminated.

14. Transport information

- 14.1 International Air Transportation Association Classification (IATA): This product is not classified as hazardous.
- 14.2 International Maritime Organization (IMDG): This product is not classified as hazardous.
- 14.3 14.3 UN, IMO, ADR/RID, ICAO Code: This product is not classified as hazardous.

15. Regulatory information

- 15.1 EU / National regulations: This product does not require a hazard warning label in accordance with EC Directives.

16. Other information

- Company name: Formfutura VOF
- Additional data: In addition to the information given in this Material Safety Data Sheet (MSDS) we refer to the products specific Technical Data Sheet (TDS).
- Disclaimer: The information given in the Material Safety Data Sheet only applies to the described product in connection with its appropriate use. All information is based on the latest state of our knowledge. In particular, it describes our product under the aspect of possible hazards and pertaining safety measures. The information does not constitute any guarantee of specific product and/or quality properties. The information given in this Material Safety Data Sheet is not required according to article 31 and Annex II of Regulation (EC) No.1907/2006. It merely serves the purpose of providing sufficient information on a voluntary basis to ensure safe use of the compound/product. There is no obligation on the part of Formfutura to revise this document.

Formfutura VOF
Groenestraat 215
6531 HH Nijmegen
The Netherlands

CoC: 55502105
VAT: NL851741083B01
EORI: NL851741083

Phone: +31 (0)85 002 0881
Email: info@formfutura.com
Website: www.formfutura.com