

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO GUIADO POR
COMPUTADOR PARA MANUFACTURA ADITIVA DE COMPONENTES
MECÁNICOS EMPLEANDO FDM

FABIÁN ANDRÉS PIÑEROS RUBIO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2021

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO GUIADO POR
COMPUTADOR PARA MANUFACTURA ADITIVA DE COMPONENTES
MECÁNICOS EMPLEANDO FDM.

FABIÁN ANDRÉS PIÑEROS RUBIO

Trabajo de grado en la modalidad de solución de problema de ingeniería para
optar al título de ingeniero mecánico

Director

Oscar Rodrigo López Vaca

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2021

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá 15 de marzo de 2021

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	13
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. GENERALIDADES DE LA AM	14
2.1 MANUFACTURA ADITIVA Y CLASES DE AM	14
2.2 ELEMENTOS FINITOS (FEM)	18
2.3 PROBLEMÁTICAS DE LA AM	20
2.4 ENTORNO DE ANSYS	22
2.5 ANTECEDENTES DE LA AM	24
3. ESPACIO DE DISEÑO PARA LA MANUFACTURA ADITIVA	26
3.1 FDM EN COLOMBIA	26
3.2 PROBLEMÁTICAS DEL FDM EN COLOMBIA	29
3.3 PARÁMETROS Y VARIABLES DE IMPRESIÓN EN FDM	31
3.4 ESPACIO DE DISEÑO	32
3.5 CONCLUSIÓN CAPITULO 3 “ ESPACIO DE DISEÑO ”	33
4. FLUJO DE ACTIVIDADES PARA LA METODOLOGÍA DE DISEÑO GUIADO EN AM ¡Error! Marcador no definido.	
4.1 ANTECEDES DEL FLUJO DE TRABAJO (WORKFLOW) EN ANSYS ADDITIVE	¡Error! Marcador no definido.
4.2 FLUJO DE TRABAJO	¡Error! Marcador no definido.
4.3 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 4	¡Error! Marcador no definido.
5 FÉRULA PARA EXTREMIDAD DELANTERA DE UN PERRO CON LESIÓN DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR: ESTUDIO DE CASO ¡Error! Marcador no definido.	
5.1 PASO 1: DISEÑO CONCEPTUAL Y MECÁNICO . ¡Error! Marcador no definido.	
5.2 PASO 2: CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS CAD	¡Error! Marcador no definido.
5.3 PASO 3: DISEÑO DE DETALLE A PARTIR DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	¡Error! Marcador no definido.
5.4 PASO 4: OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA MEDIANTE ESTRUCTURAS TIPO LATTICE	¡Error! Marcador no definido.
5.5 PASO 5: SIMULACIÓN MEDIANTE ANSYS ADDITIVE	¡Error! Marcador no definido.
5.6 PASO 6: SIMULACIÓN EN ULTIMAKER CURA	34
5.7 PASO 7: IDENTIFICACIÓN DE POSICIÓN Y MIGRACIÓN DE DATOS	37

6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Consecuencias en el tamaño del grosor de capa	15
Figura 2. Esquema del proceso FDM.....	15
Figura 3. Esquema del proceso PBF.....	16
Figura 4. Esquema del proceso SLA	16
Figura 5. Esquema del proceso DED	17
Figura 6. Generación de soportes de impresión desde ANSYS Additive Prep	18
Figura 7. Proceso de validación del MEF	19
Figura 8. Flujo de trabajo para MEF	19
Figura 9. Conducto regular en el uso de ANSYS Additive para la AM.....	22
Figura 10. Proceso de Optimización Topológica.....	23
Figura 11. Parámetros del FDM.....	31
Figura 12. Impresora Creality Ender 3	32
Figura 13. Diagrama de metodología de diseño para AM	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Comparación entre la extremidad sana y la extremidad afectada.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Partes de las extremidades delanteras de un perro	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Visualización de articulaciones presentes en las extremidades de un perro	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Férulas rígidas para extremidades de perros.....	¡Error! Marcador no definido.

Figura 18. Guía de medidas para selección de férula **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 19. Flexión natural de la articulación metacarpiana .. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 20. Férulas articuladas para humanos **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 21. Ortesis funcionales articuladas **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 22. Boceto de extremidad identificando sus ángulos **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 23. Boceto extremidad delantera seccionada..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 24. Primer boceto del mecanismo **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 25. Segundo boceto del mecanismo **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 26. Tercer boceto del mecanismo..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 27. Modelo CAD extremidad delantera **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 28. Vista Isométrica férula y modelo de extremidad delantera **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 29. Vista lateral de férula y extremidad delantera **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 30. Detalle Isométrico de sistema de unión y pestaña.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 31. Modelo de Férula en entorno de Spaceclaim **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 32. Identificación de componentes en modelo de férula.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 33. Penetración de contactos en Contact Tool ANSYS Workbench **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 34. Brechas de contactos en Contact Tool ANSYS Workbench...**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 35. Estado de contactos en Contact Tool ANSYS Workbench **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 36. Mallado para ensamble de férula **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 37. Calidad de Elemento para mallado de ensamble de férula ¡Error! Marcador no definido.

Figura 38. Definición de cargas y sus parámetros ¡Error! Marcador no definido.

Figura 39. Definición de cargas y sus parámetros ¡Error! Marcador no definido.

Figura 40. Gráfica esfuerzo máximo por iteración dependencia de malla ¡Error! Marcador no definido.

Figura 41. Gráfica error porcentual por iteración dependencia de malla .¡Error! Marcador no definido.

Figura 42. Distribución de esfuerzos para conjunto de férulas superiores ¡Error! Marcador no definido.

Figura 43. Distribución de esfuerzos para conjunto de férulas inferiores ¡Error! Marcador no definido.

Figura 44. Distribución de esfuerzos para uniones ¡Error! Marcador no definido.

Figura 45. Distribución de esfuerzos para tornillos de uniones¡Error! Marcador no definido.

Figura 46. Definición de parámetros para la optimización de férula superior trasera ¡Error! Marcador no definido.

Figura 47. Definición de parámetros para la optimización de férula superior delantera ¡Error! Marcador no definido.

Figura 48. Definición de parámetros para la optimización de férula inferior delantera ¡Error! Marcador no definido.

Figura 49. Definición de parámetros para la optimización de férula inferior trasera ¡Error! Marcador no definido.

Figura 50. Definición de parámetros para la optimización de férula superior delantera ¡Error! Marcador no definido.

Figura 51. Definición de parámetros para la optimización de férula inferior trasera	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 52. Definición de parámetros para la optimización de férula superior trasera	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 53. Definición de parámetros para la optimización de férula inferior delantera	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 54. Definición de optimización mediante Spaceclaim utilizando comando tipo Shell.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 55. Distribución de densidades superior delantera ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 56. Distribución de densidades superior trasera	¡Error! Marcador no definido.
Figura 57. Distribución de densidades inferior delantera	¡Error! Marcador no definido.
Figura 58. Distribución de densidades inferior trasera	¡Error! Marcador no definido.
Figura 59. Simulación de posiciones para elemento de unión.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 60. Simulación de posiciones para elemento de férula inferior trasera.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 61. Simulación de posiciones para elemento de férula inferior delantera....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 62. Simulación de posiciones para elemento de férula superior delantera	¡Error! Marcador no definido.
Figura 63. Simulación de posiciones para elemento de férula superior trasera.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 64. Elementos impresos y ensamble de férula.....	37

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1. (Aplicaciones, beneficios, desventajas de los principales métodos de AM).	44
Anexo 2. (Entorno de trabajo ANSYS Workbench, para optimización topológica).....	45
Anexo 3. (Entorno e trabajo Ansys Workbench para optimización)	46
Anexo 4. ((Estado de contactos simulación de elementos finitos)	47
Anexo 5. (Estado de contactos simulación de elementos finitos)	49
Anexo 6 (Iteraciones para convergencia de mallado).....	50
Anexo 7.(Iteraciones para convergencia de mallado).....	51
Anexo 8. (Tipos de estructuras para optimización Lattice)	52
Anexo 9. (Resultados de ANSYS Additive)	53
Anexo 10. (Resultados ULTIMAKER CURA de elementos optimizados y sin optimizar)	54
Anexo 11. (Diferencia de tiempos material y costes entre componentes optimizados y sin optimizar)	55
Anexo 12. (Diferencia porcentual de tiempos material y costes entre componentes optimizados y sin optimizar).....	56
Anexo 13. (Ponderación de resultados de ANSYS Additive y ULTIMAKER CURA para selección de mejor posición).....	56

RESUMEN

Este trabajo de grado se enfoca en el desarrollo e implementación de una metodología de diseño guiada por computador para manufactura aditiva empleando FDM, a lo largo de este trabajo se hace uso de diversos programas, tales como: Solid Edge, para el diseño conceptual; ANSYS Workbench para la definición de condiciones de carga en el diseño, FEM (Análisis de elementos finitos) y optimización topológica mediante estructuras tipo Lattice ; ANSYS Additive utilizado en la simulación de impresión para el análisis de esfuerzos residuales y distorsiones geométricas; por ultimo Ultimaker CURA, utilizado en la simulación de impresión para costes y tiempos.

Dentro de los resultados obtenidos, se evidenció que la variación entre posiciones de impresión tiene incidencia en variables tales como: distorsiones geométricas, esfuerzos residuales, costos y tiempos de impresión. En primer lugar, se observa que mediante la optimización de un elemento, la cantidad de material utilizado en la impresión se reduce hasta en un 20%, sin embargo, aumenta el tiempo en un 38%, con las variaciones mencionadas se obtiene como resultado una reducción del 6.66% en el coste total; Por otra parte, la aplicación de esta metodología demostró que el correcto posicionamiento de impresión logra reducir los esfuerzos residuales en un 45%, las distorsiones geométricas en un 46% y los costes generales de impresión en un 15.52%.

Palabras Clave: FDM, FEM, Optimización Topológica, Estructuras Lattice, Esfuerzos Residuales, Distorsiones Geométricas.

INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva o AM (Additive Manufacturing) es un término utilizado para agrupar tecnologías basadas en la creación de objetos físicos, por medio de la adición de material en forma sucesiva y por niveles [1]. Este concepto relacionado con la manufactura nació aproximadamente en los años 80's, en su momento se conoció bajo el nombre de prototipado rápido, a partir de ese momento la AM ha ido evolucionando hasta llegar al punto de producir un mercado total en todos los artículos relacionados con el proceso de tres mil millones de dólares en el año 2013, mercado que creció un 35% en comparación con el 2012, que fue de dos mil doscientos millones de dólares. Para los años siguientes se esperan crecimientos del 18%, hasta el 35%. Se prevé que para el 2020 las ventas asciendan a un rango que va desde los siete mil millones hasta los veintitrés mil millones de dólares [2].

La AM es un término que abarca una gran variedad de tecnologías que cumplen con el principio de adición de material de forma sucesiva, estas tecnologías se clasifican según múltiples parámetros como: orden dimensional, procesos y estado del material en el punto de partida [3]. Existen varias dificultades que frenan la implementación a gran escala de la AM; estos inconvenientes se dividen en dos campos, el primer campo se refiere a las características finales de las piezas manufacturadas como lo son: distorsiones en la geometría, cohesión entre capas, tolerancias, esfuerzos internos, anisotropía, porosidades, entre otros [4]. La segunda sección se relaciona con los tiempos de manufactura en la AM y el uso de soportes.

La industria AM, realiza procesos enfocados a la validación de porosidad en las piezas manufacturadas, este proceso suele durar aproximadamente 67 horas, pero en el itinerario de una empresa puede representar hasta 2 semanas, esta situación implica una generación excesiva de costos para el proceso. Desde hace algunos años se ha venido desarrollando una solución a esta problemática; esta alternativa se basa en la implementación de herramientas de simulación utilizadas para el modelamiento del proceso de manufactura aditiva, esta nueva opción representa una disminución del 90% en los tiempos del proceso, lo cual, significa una reducción considerable en costos. Estas herramientas constituyen el presente y futuro de la AM, por ende, es necesario incursionar de forma participativa con investigaciones que ayuden a la progresión constante en esta área de la manufactura [5].

En cuanto a la simulación de estas tecnologías, existen algunas empresas de gran relevancia para la ingeniería, las cuales están incursionado con gran fuerza dentro del modelamiento de estos procesos, en el 2018 ANSYS anuncio nuevos módulos dentro de sus servicios: ANSYS Additive Print y ANSYS Additive Suite, estas herramientas permiten detectar, medir y corregir las problemáticas de manufactura en la AM.

Conforme a las problemáticas mencionadas anteriormente, este trabajo pretende incursionar en el uso de técnicas y herramientas apropiadas que faciliten la generación de piezas manufacturadas mediante AM, haciendo uso de herramientas como ANSYS Additive y ANSYS Workbench.

La aparición de nuevas formas de manufactura avanzadas junto con la demanda de productos y servicios más personalizados, generan cambios en las metodologías y procesos de fabricación [6]. La manufactura aditiva es una tecnología con la cual se busca satisfacer estas demandas, dado que posee una gran cantidad de ventajas respecto a los procesos de manufactura convencionales, dentro de estas ventajas se encuentran:

- La producción de pequeños lotes es económicamente más atractiva en relación a los métodos de fabricación en serie.
- Ahorros significativos en cuanto materia prima, dado que se puede reutilizar el material de desecho.
- La producción de geometrías complejas, las cuales serían imposibles de fabricar con los métodos convencionales.
- La producción directa a partir de modelos CAD, genera un ahorro en cuanto a moldes y herramientas especializadas.

Estas ventajas respecto a la manufactura tradicional han despertado el interés de varias industrias a nivel mundial, entre las cuales se encuentran: la industria aeroespacial, médica, energética, dental, entre otros[7]. La investigación alrededor de la AM, actualmente se concentra en la resolución de las problemáticas geométricas y topológicas utilizando software de modelamiento, en el cual se pueden realizar diversos tipos de análisis respecto a diferentes procesos de la AM. La aplicación de la simulación en este método de manufactura es una novedad en el mundo de la ingeniería, por lo tanto, es preciso incursionar en esta área, para lograr desarrollar una metodología respecto al diseño de piezas manufacturadas mediante AM utilizando un software de modelamiento del proceso.

Por otra parte, es importante plantear unas bases respecto a las metodologías para la fabricación de piezas por medio de AM utilizando software, dado que es importante determinar la importancia e incidencia que poseen las variables de entrada sobre las variables de salida, respondiendo preguntas tales como:

- ¿La posición de impresión incide de manera significativa a los costes totales del producto?
- ¿Afecta la posición de impresión a la distribución de esfuerzos?
- ¿Es posible mitigar la distorsión en la geometría modificando parámetros en los soportes de impresión?

Este trabajo tiene como finalidad proponer una metodología acorde a las problemáticas actuales de manufactura aditiva en Colombia, ya que la industria colombiana respecto a la manufactura aditiva se enfoca en la tecnología FDM, sin tener en cuenta las herramientas de simulación y manufactura asistida por ordenador.

La metodología comienza su ruta de trabajo en la geometría inicial, para luego seguir con la optimización topológica y llegar a la simulación de impresión. Esto se desarrollará con la intención de incursionar en el desarrollo de la manufactura aditiva, dado que esta tecnología representa un gran avance en la manufactura de elementos mecánicos. Este trabajo servirá como soporte para próximas investigaciones relacionadas con este método de manufactura.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología de diseño guiada por computadora para manufactura aditiva de componentes mecánicos empleando FDM.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.2.1. Definir el espacio de diseño para manufactura aditiva en función de las capacidades y restricciones del proceso FDM
- 1.2.2. Establecer flujo de actividades de diseño guiado por computador para la manufactura aditiva de componentes empleando FDM.
- 1.2.3. Realizar un estudio de caso empleando la metodología propuesta.

2. GENERALIDADES DE LA AM

2.1 MANUFACTURA ADITIVA Y CLASES DE AM

- MANUFACTURA ADITIVA

La manufactura aditiva AM es una amplia categoría tecnológica y de fabricación, la cual comprende varios tipos de subconjuntos, el principio básico que rige este tipo de manufactura es la generación de objetos tridimensionales a partir de un modelo CAD, haciendo uso de una técnica aditiva de capa por capa [8]. Aunque este concepto de manufactura se conoce desde hace varias décadas, no fue hasta hace algunos años que comenzó a tomar popularidad en el ámbito de producción industrial, generando una alternativa de fabricación respecto a la manufactura sustractiva [9].

Algunas de las ventajas más significativas de este tipo de manufactura, respecto a los métodos convencionales, son la planificación y los costos del proyecto. En la fabricación sustractiva es necesario tener en cuenta múltiples factores como el orden en la fabricación de características, las herramientas necesarias para el proceso y los accesorios adicionales para completar la pieza; en contraste, en la AM solo es necesario una comprensión del proceso a ejecutar, las propiedades de la materia prima y los detalles dimensionales de la pieza. [10].

El factor fundamental que obedece este tipo de manufactura es la creación de objetos por medio de capas, estas derivan de un archivo STL (Standard Triangle Language o StereoLitography), el cual a su vez proviene de un modelo CAD, en el mundo real estas capas tienen un valor finito de grosor, esto causa que la geometría real sea una aproximación del modelo virtual CAD, la afinidad del modelo real al modelo virtual, dependerá en primera instancia de la cantidad de capas que se generen (Figura 1). Los subconjuntos de la AM se basan en el mismo principio de capas, los factores que los diferencian son: los materiales que pueden ser utilizados, como se crean las capas y como se unen las capas [10].

Figura 1. Consecuencias en el tamaño del grosor de capa



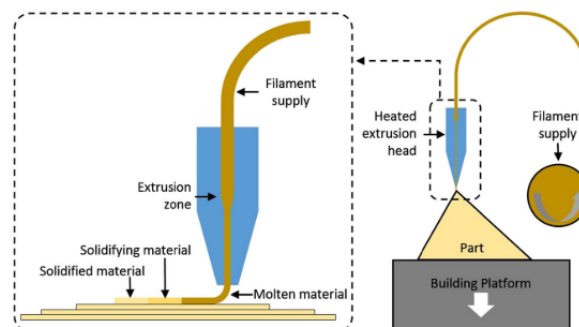
Fuente. [10]

- CLASES DE PROCESOS EN MANUFACTURA ADITIVA

Alrededor de este tipo de manufactura se desglosan diferentes tipos de procesos, los cuales se dividen en diferentes tecnologías. A continuación, se mencionan los principales procesos de la AM y en el Anexo 1 es posible observar las ventajas, desventajas y aplicaciones de estas tecnologías.

- FDM (Fused Deposition Modeling): Esta tecnología es la más popular dentro de la AM, se basa en la extrusión de un filamento continuo para imprimir capas en 3D, este se calienta hasta un estado semi-líquido y luego se extruye sobre la plataforma o capa antecesora, para crear el objeto en 3D (Figura 2) [11].

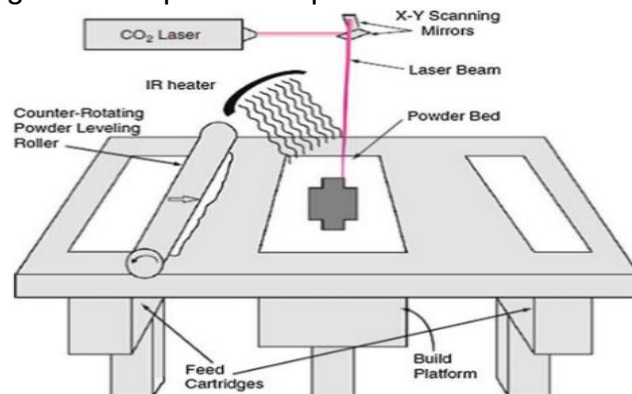
Figura 2. Esquema del proceso FDM



Fuente. [13]

- PBF (Power Bed Fusion): Esta técnica se enfoca en extender capas de polvos muy finas, las cuales se fusionan por medio de rayos láser o aglutinante, posteriormente se extienden más capas de polvo y se repite el proceso hasta formar el objeto 3D (Figura 3) [12].

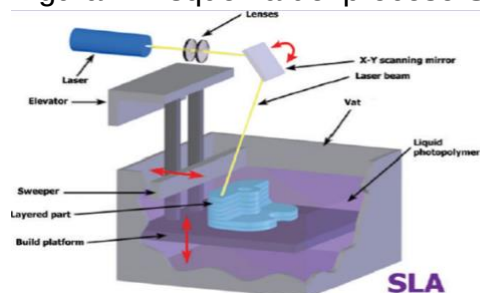
Figura 3. Esquema del proceso PBF



Fuente. [10]

- MJ (Material Jetting): Esta técnica se fundamenta en la inyección de material utilizando boquillas delgadas las cuales rocían de manera controlada el material en forma de gotas pequeñas, generalmente un aglutinante para unir las partículas de polvo, en algunas de estas tecnologías se utilizan rayos UV para realizar un proceso de curado de la pieza[13].
- SLA (Stereolithography): Esta tecnología se basa en la utilización de rayos UV para iniciar una reacción en cadena en una capa de resina o solución de monómero. Los monómeros son activos ante la luz UV, lo cual causa que se conviertan instantáneamente en cadenas poliméricas, estas cadenas se solidifican formando un patrón (Figura 4) [14].

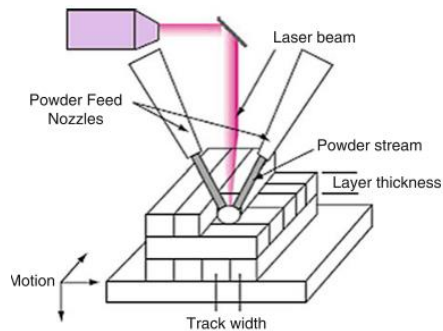
Figura 4. Esquema del proceso SLA



Fuente. [3]

- DED (Direct Energy Deposition): Esta tecnología se ha utilizado mayormente en la creación de súper aleaciones metálicas, se usa una fuente de energía que se dirige a un punto focal en el cual se suministra material en forma de alambre o polvo, el material fundido se deposita en el sustrato para luego solidificarse (Figura 5) [4].

Figura 5. Esquema del proceso DED

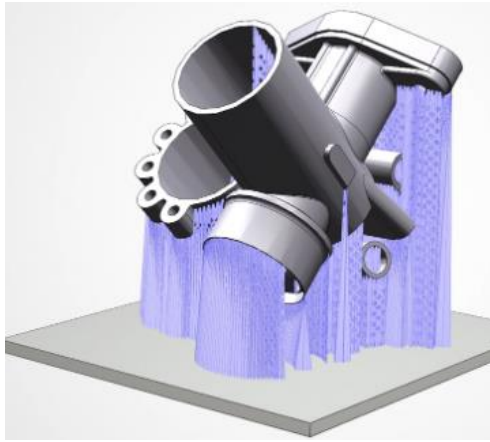


Fuente. [10]

- LOM (Laminated Object Manufacturing): Este método fue uno de los primeros en ser comercializado, se basa en el corte y laminado de capas de material, las capas se cortan mediante láser o prensa, y luego se colocan de forma sucesiva, para realizar la unión entre capas se puede utilizar aglutinantes o por medio del suministro de calor en el caso metálico [14]
- DISEÑO EN SOPORTES DE IMPRESIÓN

La fabricación aditiva AM requiere estructuras de soporte externas como se puede ver en la Figura 6, dado que los materiales utilizados en este proceso no proporcionan suficiente soporte para la pieza 3D. Las estructuras de soporte generalmente son huecas o celulares, estas son eliminadas después de la construcción del objeto, por lo tanto, representan un desecho en el proceso de fabricación de la AM.

Figura 6. Generación de soportes de impresión desde ANSYS Additive Prep



Fuente. [23]

La construcción de estos soportes significa un aumento en los tiempos de construcción del objeto en cuestión, como también el gasto de material excesivo. Después de terminar la generación del objeto son necesarios trabajos de remoción para los soportes, la dificultad de estos trabajos se relaciona directamente con la complejidad de los soportes. Los tiempos de construcción y procesos post-construcción representan gastos adicionales en este tipo de manufactura, esto causa una disminución competitiva de la AM comparándola con los métodos de manufactura convencionales [15].

La minimización de soportes puede acortar los tiempos de operación y el gasto de material, mejorando la eficiencia del proceso. En consecuencia, el diseño y optimización de soportes constituyen una demanda para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de la AM [15].

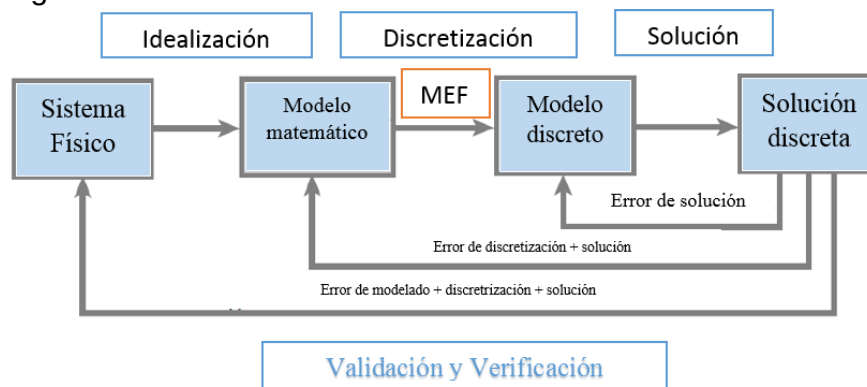
2.2 ELEMENTOS FINITOS (FEM)

El método de los elementos finitos (MEF) es un procedimiento numérico que se utiliza para la resolución de problemas complejos relacionados con el análisis en ingeniería, estos problemas pueden ser de mecánica, fluidos, vibraciones, térmicos, entre otros. El concepto básico de este método consiste en remplazar un sistema real por la unión de una gran cantidad de problemas pequeños. Cada uno de estos elementos se

comporta como un miembro continuo, conocido como elemento finito (EF), estos se conectan entre sí por puntos llamados nodos[16].

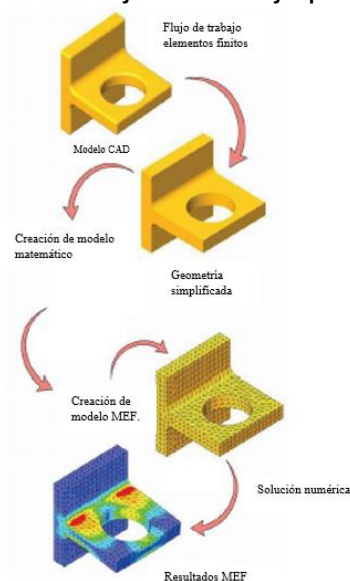
La idea es que, si se asumen adecuadamente las soluciones de varios EF, se puede lograr una convergencia de la solución exacta del sistema global, para esto es necesario aumentar la cantidad de EF. La unión de EF y nodos se le denomina malla, para obtener la solución total del sistema es necesario satisfacer las ecuaciones de equilibrio de los nodos, como también las ecuaciones de compatibilidad relacionadas con los desplazamientos entre los EF; en la Figura 7 se puede observar el proceso secuencial que es desarrollado en un análisis de MEF de forma gráfica y en la Figura 8 se puede observar el diagrama de flujo relacionado con este tipo de análisis.

Figura 7. Proceso de validación del MEF



Fuente. [15]

Figura 8. Flujo de trabajo para MEF



Fuente. [15]

Dentro de este método existen dos tipos de esquemas, el implícito y el explícito, además existen dos tipos de formulaciones la euleriana y lagrangiana. El conducto regular de ejecución de MEF para análisis computacional es el siguiente: en primer lugar, se debe definir la geometría, luego se deben aplicar las ecuaciones de gobierno como las mecánicas y constitutivas, después se definen las restricciones tales como contactos y fuerzas, a continuación, se divide el problema en elementos geométricos sencillos (mallado) y para finalizar se resuelve el sistema de ecuaciones y se analizan los resultados [16].

2.3 PROBLEMÁTICAS DE LA AM

A pesar de las ventajas que ofrece la AM, como la libertad de diseño, el ahorro de material y la capacidad de generar geometrías complejas, aún existen varias problemáticas que frenan su implementación definitiva. Estas problemáticas incluyen altos costos, anisotropía, generación de esfuerzos internos, altos niveles de porosidad, distorsiones de la geometría, limitaciones en cuanto la producción en masa, entre otras. A continuación se realizará una breve descripción de las problemáticas mencionadas [14].

- **ANISOTROPÍA** El comportamiento anisotrópico es uno de los principales retos a resolver para la AM. Debido a la naturaleza de la AM, la cual es la generación de un modelo 3D capa por capa, la microestructura del material dentro de cada capa es distinta a los límites en los cuales esta se encuentra unida con la siguiente, por esta razón se presenta un comportamiento anisotrópico en las propiedades de la pieza. En cuanto al comportamiento mecánico es diferente según la orientación de la pieza. En el proceso de PBF para fundición de metales, al calentar las capas siguientes a la primera, se genera una transferencia de calor sobre la capa anterior lo cual causa una microestructura de grano diferente debido a los gradientes térmicos [17].
- **POROSIDAD** La generación de agujeros dentro del material impreso constituye uno de los principales problemas de la AM. La porosidad adicional creada por el proceso de impresión puede provocar una reducción significativa en las propiedades mecánicas de la pieza manufacturada. Esta problemática por lo

general se le atribuye al proceso de AM empleado para fabricar la pieza o al tipo de material utilizado [18].

- **DISTORSIONES DE GEOMETRÍA** Distorsiones debidas al CAD: La principal herramienta para diseñar las piezas dentro de la manufactura AM es la utilización de un modelo CAD. Los modelos CAD son una combinación de una geometría sólida y límites, esta unión constituye un sistema teselado. Sin embargo al momento de generar la pieza 3D respecto al modelo CAD se producen imperfecciones asociadas con las limitaciones del proceso de fabricación [19].

Distorsiones debidas a las condiciones de impresión: Estas distorsiones se presentan debido un reacomodamiento del material mientras se está gestando el proceso, debido la transferencia de calor que se genera sobre las capas que están desarrollando la solidificación se generan desajustes en la geometría final de la pieza [20].

Distorsiones debidas a post-procesamiento: En la todos los procesos de la AM es necesario situar una base donde construya la primera capa de material. Al concluir el proceso de generación del sólido, es necesario ejecutar algunos procesos de post fabricación, los cuales se basan en la separación del solido fabricado de la base, esto causa que se generan distorsiones en la geometría final de la pieza.

- **GENERACIÓN DE ESFUERZOS INTERNOS** Esta problemática es una de las más importantes cuando se habla de la fabricación de elementos mecánicos, la generación de un ciclo térmico de rápido calentamiento y enfriamiento es similar al proceso de soldadura, lo cual genera esfuerzos residuales. Estos esfuerzos se producen cuando la fuente de energía calienta el material de alimentación de forma rápida, esto causa que el material tienda a expandirse, pero esta expansión se ve restringida por los materiales circundantes los cuales tienen una temperatura más baja. Por lo tanto esto genera un estado de compresión lo cual se traduce en esfuerzos internos.[20].

2.4 ENTORNO DE ANSYS

Esta compañía se enfoca en el desarrollo y comercialización de software especializado en el análisis de elementos finitos aplicado a problemas de ingeniería. Este software es capaz de modelar procesos relacionados con mecánica de materiales, mecánica de fluidos, electromagnetismo, entre otros. Además, se tiene la capacidad de simular esfuerzos, velocidades de fluidos, elasticidades, distribuciones de temperatura, deformaciones, ondas electromagnéticas entre otras.

Este software se divide en módulos que permiten analizar un fenómeno complejo de forma separada, esto se realiza con la finalidad de obtener resultados con mayor facilidad, además cuenta con un módulo que permite integrar de forma armónica todos los fenómenos que se presentan en el modelo, este módulo se conoce como ANSYS Workbench.[21].

- ANSYS ADDITIVE

Este nuevo módulo de ANSYS ofrece un flujo de trabajo completo para la simulación de AM, el cual permitirá realizar una transición desde la simulación de esfuerzos hasta la fabricación aditiva del componente. Este módulo se enfocará en un proceso específico de la AM, el cual será el PBF o SLS (Sinterización selectiva por láser).

Este módulo ofrece ayudas como: el diseño para la AM (DfAM) , optimización topológica, validaciones de diseño, estructuras de red, microestructuras, configuración de construcción, posicionamiento de impresión, generación personalizada como automática de soportes, simulación del proceso de impresión y demás ayudas (Figura 9) [21].

Figura 9. Conducto regular en el uso de ANSYS Additive para la AM



Fuente. [20]

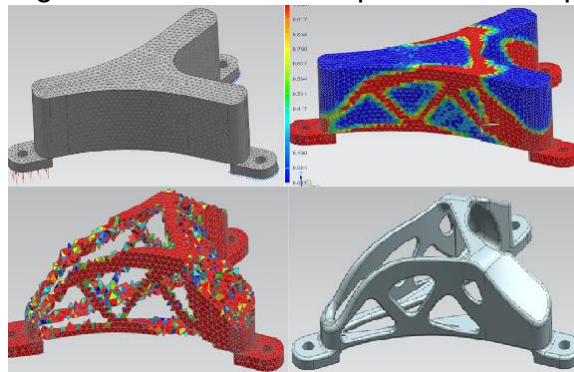
- ANSYS DISCOVERY SPACECLAIM

ANSYS Discovery Space Claim es una aplicación de modelado 3D multipropósito, la cual proporciona soluciones eficientes a problemas de modelado comunes, este módulo de ANSYS permite la creación de modelos 3D por medio del modelado directo, lo cual simplifica el proceso de modelado, además cuenta con herramientas para eliminar problemas en geometrías CAD relacionados con las operaciones CAD en 3D [22].

- OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica es un método por el cual se realizan modificaciones topológicas o se implantar diferentes configuraciones geométricas, con la finalidad de optimizar la estructura en cuanto a cantidad de material utilizado, pero con la particularidad de mantener el comportamiento de la estructura inicial hacia los factores externos como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10. Proceso de Optimización Topológica



Fuente. Extraído de <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-10012017/>

La optimización topológica en el diseño estructural tiene un gran impacto en el rendimiento de las estructuras, desde que se logró implementar el “método homogenización” para generar topologías óptimas en elementos estructurales, esta metodología de diseño ha tomado gran relevancia. Esta técnica se puede aplicar a dos escalas, la macroestructural y la microestructural [23].

2.5 ANTECEDENTES DE LA AM

La manufactura aditiva nació aproximadamente en el año 1986 bajo el nombre de prototipado rápido, esta nomenclatura se consideró incorrecta dado que definía al proceso como la creación de un prototipo de producto y no un producto finalizado[10]. El primer proceso que constituyó la manufactura aditiva fue el SLA (Stereolithography), desarrollado y comercializado por 3D systems, años después en 1991 llegaron al mercado tres nuevos procesos: el FDM (Fused Deposition Modeling) por Stratasys, el SCG (Solid Ground Curing) por Cubital y el LOM (Laminated Objects Manufacturing) por Helisys. Estos cuatro procesos constituyeron las bases de la AM, siguiente a esto en el año 1993 se produjo invención de la DSPC (Direct Shell Production Casting) la cual se basaba en deposición de aglutinante sobre polvo de cerámico, este proceso daría las bases para el proceso MJ (Material Jetting) [24].

La AM sufrió un lapso de tiempo en el cual no se generaron avances significativos, no fue sino hasta el año 2000 que surgieron algunas investigaciones y patentes, las cuales constituyeron diversas familias de tecnologías derivadas de los procesos fundamentales de este tipo de manufactura. En 2009 se vence la patente del FDM, lo cual generó una gran cantidad de iniciativas respecto a la producción de impresoras 3D, esto a su vez despertó un interés en torno a este tipo de manufactura, causando el desarrollo de gran variedad de artículos, patentes, libros e investigaciones acerca del desarrollo de la AM.

- ANTECEDENTES DE SIMULACIÓN DE LA AM

El modelado y la simulación de la AM desempeñaron un papel vital para el mejoramiento del proceso tradicional de la AM enfocado a la prueba y error para la optimización y diseño de piezas. Además generan un desarrollo de conocimiento en cuanto a la cuantificación e influencia que poseen las variables del proceso, gracias a esto habrá una comprensión más clara de los procesos físicos básicos que se encuentran presentes en la AM [25]. Las herramientas de simulación y modelado utilizadas en el procesamiento de materiales fueron las antecesoras de los instrumentos de simulación para la AM, pero las ecuaciones constitutivas utilizadas en procesos de fundición estándar no siempre proporcionan una descripción apropiada para la AM, esto se comprobó mediante métodos experimentales [26]. Por esta razón, para la simulación de la AM fue necesario plantear nuevas ecuaciones constitutivas según la tecnología y el material que estuvieran implicados en el proceso.

La simulación de AM, se enfoca en cinco ítems, los cuales son: modelado de procesos físicos, modelado de microestructuras, rendimiento y topología, modelado de propiedades y optimización de procesos. El modelamiento de estos ítems proporciona un enfoque computacional integrado y esto a su vez permite a la ingeniería una optimización en los procesos de la AM. El modelamiento de procesos a escala macro permiten determinar los defectos y esfuerzos residuales que se presentan en elementos manufacturados mediante AM, además permite predecir diferentes morfologías y orientaciones cristalográficas, así como la distribuciones de tamaño de grano en función de la posición de la pieza[27]. En cuanto a simulaciones para determinar esfuerzos residuales, existen varios autores que han realizado estudios relacionados con los materiales más utilizados en la AM metálica, enfocados a procesos como DED [4].

En cuanto a la optimización topológica enfocada a la AM, existen autores que han realizado procesos de mejoramiento topológico aplicado a la creación de elementos mecánicos ligeros, en la industria aeronáutica uno de los factores de gran relevancia es el peso de los elementos, mediante manufactura sustractiva los componentes poseen una alta densidad, lo cual impide su implementación en esta industria, por lo cual la AM combinada con la optimización topológica significan una opción factible para esta aplicación [28].

Respecto al análisis micro estructural y porosidad en elementos fabricados mediante AM, recientemente algunos autores han enfocado sus esfuerzos al estudio de la relación de estos factores en las propiedades mecánicas de los elementos manufacturados. En el proceso de PBF no es factible la fabricación de elementos con densidades perfectas, por lo tanto es necesario saber cómo la densidad y la microestructura afectan a temas mecánicos como la fatiga de los elementos, además se analizan temas como la efectividad de procesos posteriores a la fabricación para la mejora de problemas como la densidad desigual y la porosidad excesiva [29].

Tomando en cuenta todo lo anterior, se puede observar que el análisis de las problemáticas de la AM se ha venido enfocando en la validación y solución de las mismas por separado, aun no se ha realizado una metodología enfocada al diseño para fabricación de manufactura aditiva. Una metodología que logre integrar mediante un flujo de trabajo continuo diferentes problemáticas y parámetros incluidos dentro del proceso de la AM. Esto se logrará utilizando software de simulación para realizar dicha integración con la finalidad de crear un proceso continuo de diseño, en el

cual se logren individualizar e identificar los parámetros claves para la generación de las problemáticas mencionadas.

3. ESPACIO DE DISEÑO PARA LA MANUFACTURA ADITIVA

En este capítulo se realizó un recorrido para definir el espacio de diseño en el cual es viable y factible aplicar la metodología de diseño guiado por computador para la AM, este recorrido comienza haciendo una recopilación de antecedentes del FDM en Colombia, en el cual se identifican las primeras empresas en incursionar con estas tecnologías y el cómo ha evolucionado este sector en el país. Siguiendo se investigó acerca de las problemáticas que aquejan a este tipo de tecnologías en el país, haciendo énfasis en las problemáticas del proceso como las de entorno, posterior se definieron los parámetros y variables de impresión en un proceso de FDM estándar y para finalizar se estableció el espacio de diseño, tomando en cuenta: La situación actual, variables, parámetros y problemáticas de esta tecnología en Colombia.

3.1 FDM EN COLOMBIA

La patente del FDM se presentó en octubre de 1989 por la empresa Stratasys, realizada por S. Scott Crump, esta patente abarca cualquier sistema para depositar material, incluyendo tecnologías como FDM o Material Jetting. Cuando esta patente caduca en 2009, diversos fabricantes comenzaron a desarrollar modelos de impresoras tipo FDM de bajo costo, en este momento comenzó el auge de las impresoras a nivel mundial, este fenómeno comenzó en países como Estados Unidos y Alemania, para luego expandirse por toda Europa y el continente asiático.

La incursión del FDM en Colombia se dio gracias a que algunas empresas comenzaron a trabajar como distribuidores de Stratasys (Dueños de la patente) y prestadores de servicios 3D, una de estas empresas fue i3D la cual nació en 2007 y sus servicios relacionados con la manufactura aditiva fueron utilizados por diferentes industrias enfocadas en los campos automotriz, médico, hidroeléctrico y aeronáutico. Aun hoy en día i3D presta sus servicios dentro de Colombia

[30], aunque dentro de su portafolio de servicios se encuentran actividades aledañas a la manufactura aditiva, tales como: digitalización de objetos, escaneo de objetos físicos, ingeniería de diseño, verificación dimensional entre otras [31].

Luego de esto, en 2008, algunas empresas comenzaron a incursionar de forma activa en el mercado médico, ofreciendo bio-modelos, una de estas empresas fue DME 3D, la cual no tenía conexión alguna con Stratasys, aunque lo más posible es que estuvieran trabajando con alguna de sus impresoras 3D, esta empresa se enfocó en la construcción de implantes óseos para la reconstrucción craneal [32].

Después de que se terminara la patente de Stratasys en 2009, una gran cantidad de empresas comenzaron a trabajar en producir modelos de impresoras 3D de bajo, medio y alto costo, debido a que antes de la liberación de la patente el proceso de impresión era algo muy costoso y solo se utilizaba como algo experimental. Hasta finales de 2012 y comienzos de 2013 empezaron a llegar estas impresoras a Colombia, nacieron varias empresas que se encargaban de comercializar impresoras de gama baja y de gama media, una de estas empresas fue Print3D, que también presta servicios de asesoría y soporte para la manufactura aditiva, como también la venta de insumos y respuestas para la producción de objetos 3D [33].

A partir de este momento comenzaría una etapa de maduración de esta tecnología, en la cual ingresarían diversas empresas a cerrar vacíos del mercado, tales como distribución, mantenimiento de impresoras, producción de filamento, diseño personalizado, investigación, ingeniería, etcétera. Al mismo tiempo alrededor del mundo surgieron nuevas tecnologías en torno a este método de manufactura, los cuales incluyeron nuevos materiales y nuevos procesos, además se comenzaron a aplicar tecnologías como el CAE y FEM para el mejoramiento de procesos dentro de la AM, causando avances a paso de gigante para esta industria.

En 2017 se comenzaron a explorar nuevos caminos que llevan esta tecnología a la construcción de objetos cada vez más grandes, en este caso Argos llevó a cabo la construcción del primer prototipo de una vivienda impresa en 3D, este proyecto se conoce con el nombre de Casa Origami y contaba con un área funcional de 23.45 metros cuadrados, esta casa fue la unión de 32 piezas impresas en su totalidad, la construcción de este proyecto duró aproximadamente tres meses y fue impresa en una máquina 3D gran formato de Siemens, la cual utiliza

como “tinta” un tipo de concreto especial que cumple con todas las normas técnicas y de sismo resistencia [34].

Aunque la manufactura aditiva había madurado mucho para el 2018, aún era una industria joven y con mucho por alcanzar, en este punto se creó el primer consorcio de fabricación aditiva en Latinoamérica, el CONMAD, además también se creó la asociación de manufactura aditiva y tecnología 3D, esto se realizó con la finalidad de aumentar la cooperación científica y tecnológica en los países de la región, como también aumentar la utilización de este tipo de tecnologías en diferentes industrias, como la automotriz, medica, aeronáutica, electrodoméstica, etc.

En la actualidad esta industria ha tomado gran protagonismo en el ámbito industrial en Colombia debido al nacimiento de muchas empresas encargadas de diseñar y fabricar impresoras 3D, lo cual ha aumentado la competencia en cuanto a los precios de estas tecnologías, además con el aumento de la globalización, ahora es más fácil y económico obtener los últimos avances que se presentan en esta industria. Por ejemplo, existen muchas empresas chinas que fabrican y comercializan impresoras de gama baja, con precios muy competitivos.

Otro factor que ha causado un crecimiento exponencial de la industria es la inversión de capital económico y humano de las grandes industrias automovilísticas y aeronáuticas, estas ven en este tipo de fabricación una oportunidad importante para optimizar la geometría de ciertos elementos mecánicos, los cuales ayudaran a que los diseños globales sean más eficientes [35].

En los últimos años se ha potenciado el conocimiento en torno a la AM debido a la cantidad de usuarios que se han sumado a este mundo, esto se debe a los bajos precios de una impresora 3D, actualmente se puede conseguir una impresora 3D por 200 dólares, siendo éste un precio accesible para la mayoría de personas que quieran aprender un poco más de la manufactura aditiva, además la creación de contenido como video-tutoriales, foros y webinars han sumado conocimientos acerca de fallas y soluciones que se encuentran a la mano de todos los usuarios, esto ha causado un desarrollo importante en esta industria.

Sin embargo, en la gama baja y media de impresión 3D, aún existen muchas problemáticas respecto a la ejecución y resultados de impresión, una de las más recurrentes es la distorsión geométrica, esto se debe a que la precisión de las impresoras de bajo costo no es muy buena causando una gran cantidad de inconvenientes que se reflejan en la geometría final, este tipo de problemáticas se puede reducir variando

parámetros de impresión que tienen un gran impacto en los resultados finales. Por otra parte, la variación de estos parámetros puede afectar otro tipo de factores, por ejemplo, la reducción de la velocidad de impresión que reduce las distorsiones geométricas, pero aumenta el tiempo de impresión, esto puede suponer un problema para aquellos que esperan generar ingresos a partir de la impresión 3D.

3.2 PROBLEMÁTICAS DEL FDM EN COLOMBIA

En los últimos años la manufactura aditiva ha experimentado un gran crecimiento a nivel colombiano con la incursión de muchas empresas que han intentado potenciar el uso de estas tecnologías en el país, por medio de la prestación de servicios relacionados con las mismas, como el desarrollo y construcción de prótesis médicas, la construcción de viviendas, el entretenimiento y la industria de la manufactura en general, sin embargo, este tipo de tecnologías aún es muy joven y debido a esto, aun no cuenta con una gran atención del público en general, esto causa que su avance sea lento dentro del tejido industrial del país, además esta industria de la manufactura aditiva se divide en dos grandes sectores, el sector que se encarga de la fabricación de piezas estéticas (figuras de acción, accesorios para videoconsolas, gadgets, collares, fundas para celular, soportes para celular, etcétera), y por otra parte existe el sector que fabrica piezas funcionales (engranajes, ejes, componentes mecánicos, prótesis biomecánicas y dentales , tejidos orgánicos, viviendas , botes, carros, etcétera), la diferencia puntual entre estos dos sectores, se encuentra en las funcionalidades de las máquinas y los materiales de fabricación, por ejemplo, en el sector estético se suele utilizar impresoras de gama media y baja, las cuales son funcionales, pero la calidad de impresión de estas es muy baja, causando que las piezas presenten varias problemáticas de fabricación, los materiales más utilizados en este sector son los polímeros de diferentes tipos como PLA, PETG. ABS, entre otros. Otro factor diferenciador es que en este sector se suelen utilizar impresoras que cuentan con un espacio de fabricación no mayor a 300mm x 300mm x 450 mm, Situándose en un espacio estándar dentro de la gama media, estas impresoras se sitúan en un rango de precios que va desde 200 USD hasta 1200 USD.

Por otra parte, el sector que fabrica piezas funcionales cuenta con impresoras especializadas que tienen la capacidad de imprimir una gran variedad de materiales, entre ellos se encuentran : Polímeros, metales, cerámicos y materiales compuestos, además cuentan con sistemas de calibrado automáticos, entornos controlados, grandes dimensiones de

impresión, entre otros, sin embargo el costo de estas impresoras puede llegar hasta los 100.000 USD y los materiales de impresión pueden llegar a costar hasta 100 USD por kilogramo, lo cual significa que todos los elementos fabricados por este sector tendrán un gran costo frente al público.

En Colombia existen dos sectores mencionados anteriormente, por la parte del sector estético, existen muchos entusiastas de la impresión 3D, quienes han intentado perfeccionar cada vez más tecnologías como el FDM por medio de comunidades que intentan crear un tejido de personas que poco a poco vayan solucionando diferentes problemáticas surgidas alrededor de la fabricación de piezas en FDM y puedan compartir sus experiencias, estos entusiastas de la impresión 3D se hacen llamar “Makers”, por otra parte existen varias empresas que están intentando innovar desde hace varios años en el país por medio de estas tecnologías, estas pertenecen al sector funcional, el cual está creciendo poco a poco en el país, esto se debe a la complejidad que supone reducir los costos de fabricación para aumentar la competitividad ya que los precios de las impresoras y materiales especializados son altos en comparación a las tecnologías habituales.

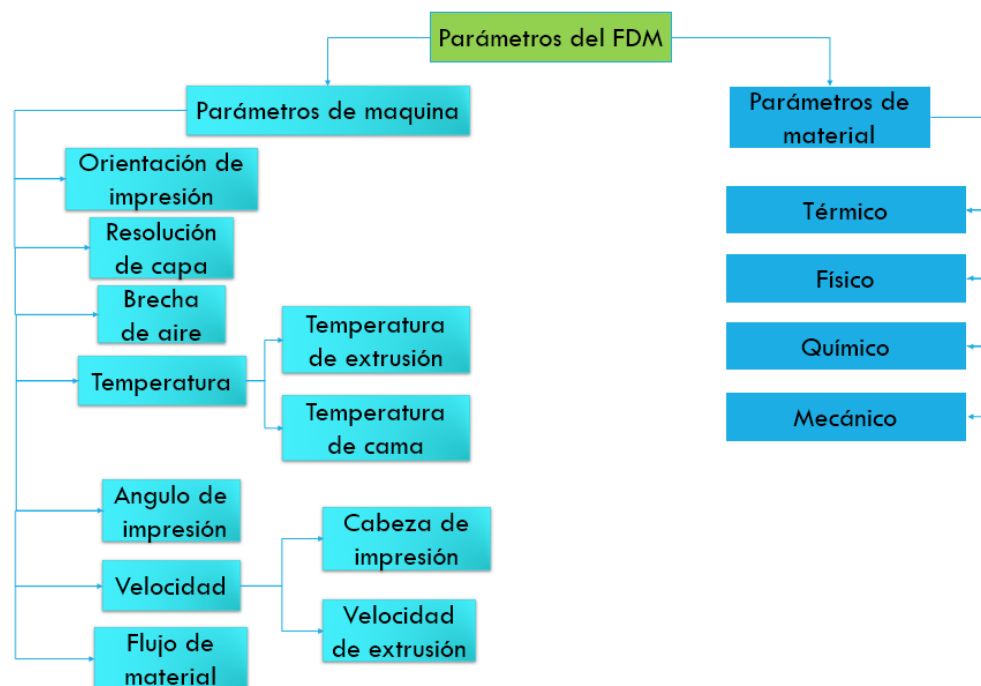
Dentro de las problemáticas de fabricación existen varias problemáticas que afectan al proceso de fabricación directamente, como lo son las distorsiones geométricas, la generación de esfuerzos internos, la falta de adherencia en las capas, la anisotropía, las micro fracturas, las fracturas en los soportes, el post procesado, los tiempos excesivos de impresión, entre otros. Todas estas problemáticas se deben a ciertos factores clave que se definen a partir del entorno de fabricación, como también de la maquinaria utilizada y el proceso de fabricación.

Estas problemáticas representan un gran inconveniente en cuanto a costos y tiempos, debido a que para la reducción de estos se deben variar ciertos parámetros de impresión que por lo general llevan a aumentar los tiempos de impresión y el material utilizado, por otra parte, en ocasiones se debe realizar la instalación de entornos controlados, aumentando los costos de fabricación y reduciendo las utilidades netas. La forma utilizada, hasta el momento, para reducir este tipo de problemáticas consiste en la repetición del proceso de impresión para así identificar la manera más óptima de imprimir una pieza, en ocasiones se llega a imprimir una pieza de 4 a 7 veces hasta encontrar un resultado óptimo, esto significa un aumento de hasta 5 veces el costo de la pieza, este método aparte de ser costoso es ineficiente, debido a que una de las grandes cualidades de la manufactura aditiva es su versatilidad en las geometrías que puede fabricar, y este método está

más enfocado a la fabricación en serie, por lo cual es un método que se debe estar cambiando cada vez que se implementa una geometría diferente. [5]

3.3 PARÁMETROS Y VARIABLES DE IMPRESIÓN EN FDM

Figura 11. Parámetros del FDM



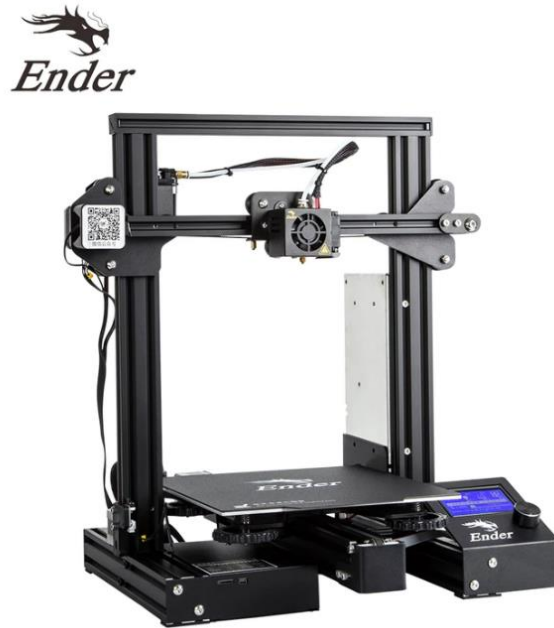
Fuente. [37]

Dentro de los parámetros de impresión se pueden encontrar dos secciones: los parámetros de la máquina y los parámetros del material (Figura 11). En esta optimización del proceso de fabricación FDM, nos enfocaremos en realizar un análisis en cuanto a la orientación de la pieza, la resolución de la capa y la velocidad de impresión.[36]

Para la fabricación de componentes haciendo uso del FDM se hace uso de impresoras de gama baja de la marca ENDER. Una de las opciones más utilizadas es la creality ENDER 3 (Figura 12) , esta impresora permite el uso de materiales tales como PLA, ABS, PETG y flexibles, cuenta con un volumen de impresión de 220x 220 x 250 mm, además

cuenta con una cama magnética flexible que puede alcanzar temperaturas hasta de 110°C y el extrusor puede alcanzar temperaturas hasta de 255°C, el diámetro de la boquilla es de 0,4 mm, la altura de capa puede estar entre 0.1 mm y 0.4 mm, el diámetro del filamento es de 1,75 mm, la precisión de esta impresora es de +/- 0.1mm y alcanza una velocidad de 180mm/s [37].

Figura 12. Impresora Creality Ender 3



Fuente. [38]

El material a utilizar será PLA (El ácido poliláctico o poliácido láctico) que es un polímero constituido por elementos similares al ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además puede ser biodegradable bajo ciertas condiciones a temperaturas del orden de 60 °C. Se puede degradar en agua y óxido de carbono. Los PLAs se producen mediante polimerización por apertura de los anillos de lactidas.

3.4 ESPACIO DE DISEÑO

Teniendo en cuenta la situación actual del FDM en Colombia y los alcances del proyecto, la máquina que se definió para el proceso y simulación, es la impresora Creality ENDER 3, el material de impresión

es PLA (Acido Poliactico), en Colombia existen varios mercados que funcionan utilizando este tipo de máquinas y tecnologías, en este caso se van a identificar tres sectores claves que podrían utilizar la metodología propuesta.

Entre los mercados que utilizan estos parámetros de fabricación esta es sector médico enfocado a humanos y animales, el sector del entretenimiento, fabricando figuras de acción o decorativas y el sector industrial, fabricando componentes mecánicos poliméricos. En este caso concreto se enfocará la metodología al sector médico para perros, en el cual las problemáticas de proceso tienen una afección significativa en los componentes finales del proceso, además este es un sector poco investigado, por lo tanto, se pueden generar mejoras importantes dentro del mismo.

En este tipo de tecnologías existen parámetros que favorecen el diseño de componentes médicos para perro, debido a que ayudan optimizar algunas variables que son importantes para estos componentes, estas variables se explican de manera más específica en el capítulo cinco, en cual se plantea el estudio de caso. En cuanto a los parámetros de impresión, esta metodología se enfocará en un parámetro, el cual es el posicionamiento de impresión, este se selecciona debido varios factores: facilidad de variación, incidencia en los resultados finales del componente y factibilidad para evaluar mediante un programa de simulación como ANSYS Additive. Además del parámetro de entrada, esta metodología evaluara como parámetros de salida, cuatro factores clave, los cuales son: distorsiones geométricas, esfuerzos residuales, costos y tiempos.

3.5 CONCLUSIONES CAPITULO 3 “ ESPACIO DE DISEÑO ”

A lo largo de este capítulo se realizó una investigación entorno al FDM en Colombia, para poder definir un segmento en el cual se logrará aplicar la metodología para simulación de manufactura en la AM, para finalizar se logró deducir que el sector médico de prótesis para perros, es un segmento óptimo de aplicación de este tipo de metodologías, pero además también se identificaron otros dos sectores en los cuales se podría aplicar este tipo de metodología (sector del entretenimiento y

sector industrial). Luego de tener claro el espacio de diseño se procede a determinar un flujo de trabajo apropiado para este espacio de diseño.

- ANÁLISIS DE RESULTADOS EN ANSYS ADDITIVE

Los resultados obtenidos en Ansys Additive muestran una relación directamente proporcional entre la cantidad de soportes y la cantidad de distorsiones geométricas, como también con los esfuerzos residuales, entre más soportes necesite la pieza se presentarán más problemáticas en el resultado final de la impresión. Para encontrar la mejor posición de impresión se valorarán los resultados obtenidos en Ansys additive y en CURA Ultimaker, Ansys additive permite encontrar la posición óptima teniendo en cuenta factores geométricos y de esfuerzos, mientras Ultimaker CURA permitirá encontrar la posición óptima respecto al coste y tiempo de impresión.

Con base en la comparación de las posiciones, se logró determinar que la variación promedio en cuanto a las distorsiones geométricas respecto a la posición más óptima y la posición menos optima de impresión es de 45,98%, es decir las distorsiones geométricas de un elemento a imprimir puede aumentar este porcentaje si se selecciona erróneamente la posición de impresión, en cuanto a los esfuerzos residuales se determinó que el porcentaje de cambio entre la posiciones más óptima y la menos optima fue del 45,01% (Anexo 9).

4.1 PASO 6: SIMULACIÓN EN ULTIMAKER CURA

Gracias al programa ULTIMAKER CURA, se realizaron dos tipos de análisis, el primero consistió en la comparación en costes, tiempos y material, para los elementos optimizados y sin optimizar; Por otra parte, se realizó la comparación entre posiciones para determinar la disminución de costes (Ver tablas de datos en Anexos 10, 11 y 12).

- DEFINICIÓN DE COSTES DE MATERIAL Y TIEMPO DE IMPRESIÓN
 - COSTE DE MATERIAL: Para obtener el coste de impresión se definió un valor comercial promedio para el kilo de filamento en \$95.000 COP, luego de esto se calculó la cantidad de metros que contiene un kilogramo de filamento de 1,75 mm de grosor, la cantidad de metros que contiene un kilogramo son 335 metros de filamento, con el costo por kilogramo y la cantidad de metros se puede calcular el costo por metro, el cual es \$283 COP/metro.
 - COSTE DE ENERGÍA: Para determinar el coste por hora de funcionamiento se indago inicialmente en el valor de kWh para un estrato tres en la ciudad de Bogotá, el cual es de \$422,26 COP/kWh, el consumo de la impresora Ender 3 es de 270 W, con estos dos valores es posible determinar el valor de funcionamiento por hora de impresión 3D en este caso de estudio.
 - El costo total de cada elemento impreso estará compuesto por el producto del costo de metro por cantidad de metros utilizados más el producto del costo de energía/hora por la cantidad de horas de impresión necesarias.
- ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ULTIMAKER CURA

Para la simulación en Ultimaker CURA se definieron las mismas posiciones que en la simulación de ANSYS Additive, tres posiciones para la pieza de unión y cuatro posiciones para cada pieza principal de las férulas, la viabilidad de cada posición se determinara por el coste total de la posición tomando en cuenta tiempo y material. Estas mismas posiciones se evaluaron para las geometrías sin optimizar para poder comparar la mejora respecto a la optimización en costes totales de cada elemento.

En cuanto al elemento de unión se determinaron tres posiciones, esta pieza se simuló con relleno total y una altura de capa de 0,2 mm, en esta pieza no se realizó optimización debido al bajo tamaño de este elemento, dentro de estas posiciones la más óptima respecto a coste total es la posición tres, esto se presenta debido a la cantidad de material que se requiere para el relleno de la pieza, en la posición uno y dos el tamaño del área en la capa es mayor que en la posición tres, lo cual causa un aumento en el coste total, esto se debe a que la relación

entre el material y el coste es mayor a la relación entre el tiempo y el coste total.

En el elemento de férula superior delantera se evaluaron dos condiciones: la primera condición fue en relleno total con una altura de capa de 0,2 mm, en la segunda condición se utilizó la geometría optimizada conseguida gracias a ANSYS con una altura de capa de 0,2 mm. Para cada condición se evaluaron las cuatro posiciones escogidas para la simulación de ANSYS Additive, de estas posiciones la más rentable en cuanto a costo total fue la posición tres, seguida de la uno, luego la posición cuatro y para finalizar la posición dos, estos mismos resultados se repitieron para las dos condiciones geométricas. En este caso en el que la geometría era más compleja que en el elemento de unión, repercuten en el costo total el material utilizado para los soportes, en cuanto más soportes necesite el elemento más material será necesario para su impresión, lo cual aumenta significativamente el costo total, entre dos elementos con una cantidad de soportes similar se deberá seleccionar la pieza con menor tiempo de impresión si se está buscando una optimización en los costos.

Para el elemento de la férula superior trasera se evaluaron la misma cantidad de condiciones y posiciones que en el anterior elemento, para este elemento la posición más óptima en cuanto a costes es la posición uno, seguida de la posición tres, sigue la posición cuatro y para finalizar la posición dos.

En el cuarto elemento de simulación, la férula inferior delantera, también se evaluaron la misma cantidad de condiciones y posiciones que en los dos elementos anteriores, en este elemento la posición más óptima es la dos, la siguiente es la uno, sigue la posición cuatro y para finalizar la tres.

Para el quinto y último elemento, la férula inferior trasera, se evaluaron dos condiciones y cuatro posiciones para cada una, en este elemento la posición más óptima es la uno, seguida de la posición dos, sigue a esta la posición cuatro y para finalizar la posición tres.

Respecto a la evaluación de todos los elementos a imprimir, se logra observar cómo existe una mejora en cuanto a la cantidad de material utilizado respecto a las condiciones evaluadas, se realizó la comparación entre la geometría sin optimizar y la geometría optimizada

y se determinó que existe una reducción del 20% en cuanto al material utilizado para la impresión, sin embargo los tiempos de impresión aumentaron un 38%, a pesar de este aumento en los tiempos de impresión se logró una reducción en costos totales del 6,66%. El aumento de tiempo se debe a que la geometría tipo Lattice que se encuentra en los elementos optimizados supone un aumento en las trayectorias realizadas para el relleno del elemento, lo cual aumenta el tiempo de impresión significativamente. Respecto a la comparación de las posiciones se logró determinar que la variación promedio en costos totales, respecto a la posición más óptima y la posición menos óptima de impresión, es de 15,52%, es decir el costo de un elemento a imprimir puede aumentar este porcentaje si se selecciona erróneamente la posición de impresión.

5.7 PASO 7: IDENTIFICACIÓN DE POSICIÓN Y MIGRACIÓN DE DATOS.

Para evaluar la posición más óptima en cuanto a los tres factores evaluados, los cuales fueron distorsión geométrica, esfuerzos residuales y costos, se realizó una clasificación de posiciones para cada factor, luego se realizó una clasificación acumulada entre los tres factores para lograr determinar la posición más óptima. Para la pieza número uno (Unión), la posición más óptima es la posición dos, para la pieza número dos (Férula superior delantera) se determinó que la posición más óptima es la número uno, para la pieza número tres (Férula superior delantera) la posición más óptima es la posición número uno, para la pieza número cuatro (Férula inferior trasera) la posición más óptima es la número dos y finalmente para la pieza número cinco (Férula inferior delantera) la posición más óptima es la número uno (Anexo 13).

Luego de identificar la mejor posición para cada elemento mecánico, se procede a descargar la geometría compensada de la simulación en Ansys Additive, esta geometría compensada, ayudara a reducir aún más las distorsiones geométricas y esfuerzos residuales del elemento, este archivo se descarga en. STL el cual es apto para su posterior impresión, en la figura 64, se pueden observar los elementos impresión y el ensamble de la férula.

Figura 13. Elementos impresos y ensamble de férula.



Fuente. Elaboración propia

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

➤ CONCLUSIONES

- Se determinó que el uso de herramientas de simulación ayuda significativamente en la optimización de los procesos de manufactura aditiva. Planteando metodologías de impresión se logran obtener mejoras cruciales, con este tipo de ayudas es posible disminuir exponencialmente el impacto de las problemáticas del proceso en el resultado final, con el avance de estas herramientas por parte de ANSYS es posible desarrollar metodologías de mayor complejidad, que permitan seleccionar todos los parámetros de impresión para obtener aun resultados en las piezas finales.
- Respecto a la implementación de estructuras tipo Lattice, en el proceso de optimización topológica, se logro determinar que existen mejoras sustanciales, en cuanto a la reducción de material y de costes generales de impresión. Sin embargo, se aumentaron los tiempos de impresión, esto se debe a que las trayectorias por capa suelen durar una mayor cantidad de tiempo por la complejidad de las estructuras Lattice. Este tipo de mejoras podrían tener mayores incidencias en otro tipo de tecnologías de la manufactura activa, como por ejemplo el LOM.
- Se demostró la posibilidad de aplicar este tipo tecnologías, a la fabricación de componentes bio-mecánicos para animales, lo cual abre posibilidades de negocio y comercialización de los servicios

de este tipo de tecnologías en el sector veterinario. Además, la aplicación de metodologías para el diseño, logra reducir sus costes generales, lo cual vuelve este tipo de mercados mas atractivos desde el punto de vista económico.

- Se evidencio que la posición de impresión de un elemento influye en diversos aspectos del resultado final de la impresión, en cuanto a los esfuerzos residuales un 45%, las distorsiones geométricas un 46% y en cuanto a coste total un 15,52 %. Con la realización de esta metodología se pueden obtener elementos, más resistentes, más exactos y menos costosos.
- Debido a los resultados obtenidos, se puede sugerir la implementación de este tipo de metodologías, en sectores de la manufactura aditiva tales como el DED, debido a que en estos campos el material de impresión suele ser compuesto de aleaciones metálicas de gran valor económico y se aplican a industrias como la aeronáutica. La reducción de costes, peso, distorsiones geométricas y esfuerzos residuales, es algo muy atractivo y compatible con este tipo de tecnología aplicada en la industria aeronáutica.

➤ RECOMENDACIONES

- Como recomendaciones para la correcta aplicación de la metodología, es necesario plantear de forma correcta todos los parámetros de simulación, para obtener resultados satisfactorios, también es oportuno recalcar que en esta metodología no se hizo uso de la totalidad de herramientas ofrecidas por el paquete de ANSYS Additive, con la aplicación de la totalidad de estas herramientas se pueden obtener una mayor cantidad de parámetros de impresión, los cuales puedan reducir aún más problemáticas del proceso.
- En cuanto a la optimización tipo lattice, teniendo en cuenta que con la aplicación se aumentan los tiempos de impresión, estos no tendrían importancia en procesos de manufactura aditiva tales como el SLA o el LOM, debido a que sin importar que tan compleja sea la capa todas tardarían la misma cantidad de tiempo por la naturaleza de la tecnología, por lo cual este proceso es idóneo para estas metodologías .

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM International and ISO, "INTERNATIONAL STANDARD ISO / ASTM Additive manufacturing — General principles — Requirements for purchased AM parts," vol. 2016, 2017.
- [2] M. J. Cotteleer, "3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth," *SIMT Addit. Manuf. Symp.*, p. 23, 2014, [Online]. Available: http://simt.com/uploads/4881/SIMT_AM_Conference_Keynote.pdf.
- [3] J. C. Ruiz-Morales *et al.*, "Three dimensional printing of components and functional devices for energy and environmental applications," *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 846–859, 2017, doi: 10.1039/c6ee03526d.
- [4] Q. Yang, P. Zhang, L. Cheng, Z. Min, M. Chyu, and A. C. To, "Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 12, pp. 169–177, 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.06.012.
- [5] E. Obandia de Escobar, "Simulation Solution for Metal Additive Manufacturing," in *Simulation Solution for Metal Additive Manufacturing*, 2019, p. Pag 22.
- [6] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [7] J. O. Milewski, *Additive Manufacturing of Metas; From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewellery*, vol. 163. Cham, Switzerland: Cham, Switzerland, 2017.
- [8] D. R. Veit, D. P. Lacerda, M. Isabel, W. Motta, and A. Dresch, "New Global Perspectives on Industrial Engineering and Management," 2019, doi: 10.1007/978-3-319-93488-4.
- [9] W. E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [10] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*. 2015.
- [11] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Adv. Manuf.*, vol. 3, no. 1, pp. 42–53, 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.

- [12] B. Utela, D. Storti, R. Anderson, and M. Ganter, "A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)," *J. Manuf. Process.*, vol. 10, no. 2, pp. 96–104, 2008, doi: 10.1016/j.jmapro.2009.03.002.
- [13] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, "Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- [14] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [15] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, "A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 9–12, pp. 1247–1254, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4403-x.
- [16] J. Narasimha Reddy, "Solutions Manual to An introduction to the finite element method," p. 766, 2006, [Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=R4rEQgAACAAJ&printsec=frontcover>.
- [17] B. E. Carroll, T. A. Palmer, and A. M. Beese, "Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing," *Acta Mater.*, vol. 87, pp. 309–320, 2015, doi: 10.1016/j.actamat.2014.12.054.
- [18] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [19] W. Oropallo and L. A. Piegl, "Ten challenges in 3D printing," *Eng. Comput.*, vol. 32, no. 1, pp. 135–148, 2016, doi: 10.1007/s00366-015-0407-0.
- [20] C. Li, Z. Y. Liu, X. Y. Fang, and Y. B. Guo, "Residual Stress in Metal Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 348–353, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.05.039.
- [21] ANSYS, "No Title," *Additive Manufacturing Simulation*, 2018. <https://www.ansys.com/products/structures/additive-manufacturing>.
- [22] ANSYS, "No Title," *ANSYS Discovery SpaceClaim*. <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>.
- [23] M. P. Bendsøe, *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*. 1995.
- [24] Wohlers Associate, "Wohlers Report 2015 – History of Additive Manufacturing," p. 34, 2015, [Online]. Available:

<https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>.

- [25] M. M. Francois *et al.*, “Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 198–206, 2017, doi: 10.1016/j.cossms.2016.12.001.
- [26] A. S. Wu, D. W. Brown, M. Kumar, G. F. Gallegos, and W. E. King, “An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 13, pp. 6260–6270, 2014, doi: 10.1007/s11661-014-2549-x.
- [27] R. Martukanitz *et al.*, “Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials,” *Addit. Manuf.*, vol. 1, pp. 52–63, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.09.002.
- [28] J. D. López-Castro, A. Marchal, L. González, and J. Botana, “Topological optimization and manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an aeronautical part in 15-5PH stainless steel,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 818–824, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.121.
- [29] W. H. Kan, Y. Nadot, M. Foley, L. Ridosz, G. Proust, and J. M. Cairney, “Factors that affect the properties of additively-manufactured AlSi10Mg: Porosity versus microstructure,” *Addit. Manuf.*, vol. 29, p. 100805, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100805.
- [30] “Hidroelectricas - i3D Fábrica Digital,” Oct. 15, 2017. <http://www.i3d.com.co/soluciones/pagina-nueva/> (accessed Feb. 28, 2021).
- [31] É. Medina, “Impresoras 3D en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com.” <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14248317> (accessed Feb. 28, 2021).
- [32] “DME 3D | Diagnóstico Médico Especializado 3D,” *Diagnostico médico especializado 3D*, Nov. 15, 2015. <http://www.dme3d.com/> (accessed Feb. 28, 2021).
- [33] “Print3D Colombia - Impresoras 3D, Scanners 3D, Insumos y más a un click - Print3d Colombia.” <https://www.print3dcolombia.com/> (accessed Feb. 28, 2021).
- [34] “Viviendas con impresión 3D | ARGOS 360.” <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/innovacion-y-tendencias/viviendas-con-impresion-3d> (accessed Feb. 28, 2021).
- [35] “El potencial de la impresión 3D en el sector transporte - Moviliblog.” <https://blogs.iadb.org/transporte/es/el-potencial-de-la-impresion-3d-en-el-sector-transporte/> (accessed Feb. 28, 2021).
- [36] F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, *Fused Deposition Modeling Strategies for Quality Enhancement*. 2020.

- [37] "Impresora 3D--Ender-3." https://www.creality.com/es/goods-detail/ender-3-3d-printer?gclid=CjwKCAiAm-2BBhANEiwAe7eyFJz5dile7Q0aTnkzYd_Uv4B9a1Inff8FSBp-seb-yQ6LOn_1pgy8GRoCADwQAvD_BwE (accessed Feb. 28, 2021).
- [38] D. Thomas, "Breaking the mold," *Archit. Dig.*, vol. 77, no. 4, pp. 120–123, 2020.
- [39] P. Bosetti, "Framing a Lighter, Stronger Race Car," no. 1, pp. 58–60, 2019.
- [40] L. Geekie, "Including Simulation in the Additive Manufacturing Workflow," vol. 8, no. 3, pp. 132–138, 2019.
- [41] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, *El perro y el gato- ATLAS EN COLOR DE ANATOMÍA VETERINARIA*. .
- [42] B. G. Klein, *CAPITULO 6 - FISILOGIA DEL MUSCULO*. 2014.
- [43] "Férulas para perros - Ortocanis.com." <https://www.ortocanis.com/es/content/53-ferulas-para-perros> (accessed Feb. 28, 2021).
- [44] "Órtesis Férulas de Polipropileno Articulas – Ortopedia Mostkoff." <https://www.ortopediamostkoff.com.mx/producto/ortesis-miembros-inferiores/ferulas/ferulas-de-polipropileno-articulas/> (accessed Feb. 28, 2021).
- [45] "Ortesis de Rodilla para perros." <https://www.ortocanis.com/es/protecciones-articulares-a-medida/231-protector-rodilla-canina-perro.html> (accessed Feb. 28, 2021).

Anexo 1. (Aplicaciones, beneficios, desventajas de los principales métodos de AM)

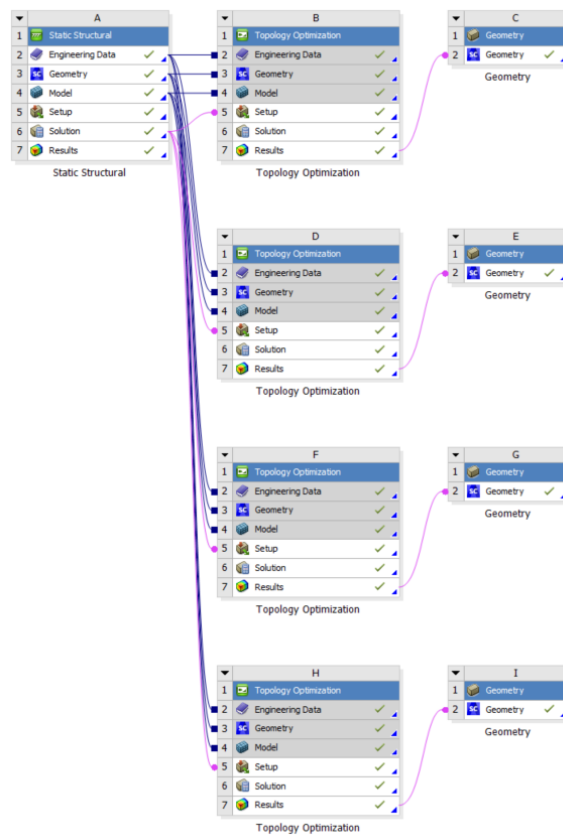
Methods	Materials	Applications	Benefits	Drawbacks	Resolution range (μm)
Fused deposition modelling	Continuous filaments of thermoplastic polymers Continuous fibre-reinforced polymers	Rapid prototyping Toys advanced composite parts	Low cost High speed Simplicity	Weak mechanical properties Limited materials (only thermoplastics) Layer-by-layer finish	50-200 μm [13]
Powder bed fusion (SLS, SLM, 3DP)	Compacted fine powders Metals, alloys and limited polymers (SLS or SLM) ceramic and polymers (3DP)	Biomedical Electronics Aerospace Lightweight structures (lattices) Heat exchangers	Fine resolution High quality	Slow printing Expensive High porosity in the binder method (3DP)	80-250 μm [13]
Inkjet printing and contour crafting	A concentrated dispersion of particles in a liquid (ink or paste) Ceramic, concrete and soil	Biomedical Large structures Buildings	Ability to print large structures Quick printing	Maintaining workability Coarse resolution Lack of adhesion between layers Layer-by-layer finish	Inkjet: 5–200 μm Contour crafting: 25–40 mm [32]
Stereolithography	A resin with photo-active monomers Hybrid polymer-ceramics	Biomedical Prototyping	Fine resolution High quality	Very limited materials Slow printing Expensive	10 μm [13]
Direct energy deposition	Metals and alloys in the form of powder or wire Ceramics and polymers	Aerospace Retrofitting Repair Cladding Biomedical	Reduced manufacturing time and cost Excellent mechanical properties Controlled microstructure Accurate composition control Excellent for repair and retrofitting	Low accuracy Low surface quality Need for a dense support structure Limitation in printing complex shapes with fine details	250 μm [23]
Laminated object manufacturing	Polymer composites Ceramics Paper Metal-filled tapes Metal rolls	Paper manufacturing Foundry industries Electronics Smart structures	Reduced tooling and manufacturing time A vast range of materials Low cost Excellent for manufacturing of larger structures	Inferior surface quality and dimensional accuracy Limitation in manufacturing of complex shapes	Depends on the thickness of the laminates

Fuente : [14]

Anexo 2. (Entorno de trabajo ANSYS Workbench, para optimización topológica)

 Polylactic acid (PLA)  	
Polylactide / polylactic acid (PLA)	
Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website . Granta provides no warranty for the accuracy of the data.	
Density	1,25e-06 kg/mm ³
Structural ▼	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	3450,0 MPa
Poisson's Ratio	0,39000
Bulk Modulus	5227,3 MPa
Shear Modulus	1241,0 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	0,00013500 1/°C
Tensile Ultimate Strength	59,200 MPa
Tensile Yield Strength	54,100 MPa
Thermal ▼	
Isotropic Thermal Conductivity	0,00014400 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	1,19e+06 mJ/kg·°C
Electric ▼	
Isotropic Resistivity	4,31e+12 ohm-mm

Fuente : Elaboración propia



Anexo 3. (Entorno e trabajo Ansys Workbench para optimización)

1A

2A

3A

3B

2B

3C

2C

3D

Fuente : ^{2D}Elaboración propia

Anexo 4. ((Estado de contactos simulación de elementos finitos))

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)	Gap (mm)	Geometric Penetration (mm)	Geometric Gap (mm)	Resulting Pinball (mm)	Real Constant
No Separation - SUPERIOR TRASERA To SUPERIOR DELANTERA	Contact	No Separation	Closed	1245,	9,8438e-020	0,	3,1556e-006	2,6889e-006	0,26977	31,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To SUPERIOR DELANTERA	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	32,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To UNION	Contact	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	33,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To UNION	Target	No Separation	Closed	81,	2,4429e-027	0,	0,28299	0,2803	0,283	34,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To UNION	Contact	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	35,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To UNION	Target	No Separation	Closed	75,	5,7197e-028	0,	0,27081	0,2754	0,27925	36,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To TUERCA	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	37,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To TUERCA	Target	Bonded	Closed	180,	3,5527e-014	0,	4,662e-008	5,7306e-008	0,1866	38,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To TUERCA	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	39,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To TUERCA	Target	Bonded	Closed	180,	4,2633e-014	0,	4,662e-008	5,9282e-008	0,18711	40,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	199,	6,5005e-014	0,	0,	5,0192e-002	0,20247	41,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	42,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	195,	8,503e-014	0,	0,	5,0192e-002	0,20955	43,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	44,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR	Contact	Bonded	Closed	217,	3,0104e-014	0,	1,8701e-004	0,2136	0,21415	45,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	46,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	47,
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR	Target	Bonded	Closed	180,	7,3285e-014	0,	2,9427e-004	0,11405	0,14307	48,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To VARILLA SUPERIOR	Contact	No Separation	Closed	1059,	2,8422e-014	0,	2,8422e-014	5,1436e-002	0,20582	49,
No Separation - SUPERIOR TRASERA To VARILLA SUPERIOR	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50,
Frictionless - SUPERIOR DELANTERA To INFERIOR DELANTERA	Contact	Frictionless	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	51,
Frictionless - SUPERIOR DELANTERA To INFERIOR DELANTERA	Target	Frictionless	Closed	277,	9,1281e-004	0,	9,1281e-004	3,866e-008	0,84919	52,
Bonded - SUPERIOR DELANTERA To M4 SUPERIOR	Contact	Bonded	Closed	76,	3,3517e-014	0,	1,8837e-004	1,9672e-005	0,22586	53,
Bonded - SUPERIOR DELANTERA To M4 SUPERIOR	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	54,
Bonded - SUPERIOR DELANTERA To M4 SUPERIOR	Contact	Bonded	Closed	78,	3,7672e-014	0,	0,	5,0022e-002	0,26487	55,
Bonded - SUPERIOR DELANTERA To M4 SUPERIOR	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	56,
No Separation - SUPERIOR DELANTERA To VARILLA SUPERIOR	Contact	No Separation	Closed	1036,	9,7269e-015	0,	2,1922e-004	1,4012e-003	0,1966	57,
No Separation - SUPERIOR DELANTERA To VARILLA SUPERIOR	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	58,
No Separation - UNION To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	122,	5,6559e-014	0,	7,364e-004	5,7337e-005	0,20012	59,

Color Legend

Red	The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no separation contact types.
Yellow	The contact status is open. This may be acceptable.
Orange	The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.
Gray	Contact is inactive. This can occur for MPC and Normal Lagrange formulations. It can also occur for auto asymmetric behavior.

Fuente : Elaboración propia

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)	Gap (mm)	Geometric Penetration (mm)	Geometric Gap (mm)	Resulting Pinball (mm)	Real Constant
No Separation - UNION To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	60,
No Separation - UNION To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	112,	5,6175e-014	0,	2,9633e-004	6,1635e-005	0,20111	61,
No Separation - UNION To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	62,
No Separation - UNION To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	112,	5,8609e-014	0,	2,8287e-004	5,8235e-005	0,20111	63,
No Separation - UNION To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	64,
No Separation - UNION To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	122,	8,8066e-014	0,	7,3482e-004	5,768e-005	0,20012	65,
No Separation - UNION To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	66,
No Separation - INFERIOR TRASERA To INFERIOR DELANTERA	Contact	No Separation	Closed	639,	6,4945e-014	0,	7,4092e-002	0,17465	0,26494	67,
No Separation - INFERIOR TRASERA To INFERIOR DELANTERA	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	68,
Bonded - INFERIOR TRASERA To TUERCA	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	69,
Bonded - INFERIOR TRASERA To TUERCA	Target	Bonded	Closed	180,	7,3522e-014	0,	6,1612e-008	8,6267e-008	0,18711	70,
Bonded - INFERIOR TRASERA To TUERCA	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	71,
Bonded - INFERIOR TRASERA To TUERCA	Target	Bonded	Closed	180,	5,8817e-014	0,	8,5708e-008	6,0475e-008	0,18711	72,
No Separation - INFERIOR TRASERA To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	269,	7,9544e-014	0,	0,	5,0086e-002	0,21491	73,
No Separation - INFERIOR TRASERA To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	74,
No Separation - INFERIOR TRASERA To M4 UNION	Contact	No Separation	Closed	273,	8,8488e-014	0,	0,	5,0091e-002	0,20697	75,
No Separation - INFERIOR TRASERA To M4 UNION	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	76,
Bonded - INFERIOR TRASERA To M4 INFERIOR	Contact	Bonded	Closed	52,	5,9742e-014	0,	1,2186e-004	2,8099e-005	0,2136	77,
Bonded - INFERIOR TRASERA To M4 INFERIOR	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	78,
No Separation - INFERIOR TRASERA To VARILLA INFERIOR	Contact	No Separation	Closed	352,	5,6843e-014	0,	1,7015e-003	1,0438e-003	0,20436	79,
No Separation - INFERIOR TRASERA To VARILLA INFERIOR	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	80,
Bonded - INFERIOR DELANTERA To M4 INFERIOR	Contact	Bonded	Closed	78,	9,1337e-014	0,	1,883e-003	0,	0,25061	81,
Bonded - INFERIOR DELANTERA To M4 INFERIOR	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	82,
No Separation - INFERIOR DELANTERA To VARILLA INFERIOR	Contact	No Separation	Closed	222,	7,6221e-015	0,	0,	1,0754e-002	0,20418	83,
No Separation - INFERIOR DELANTERA To VARILLA INFERIOR	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	84,
Bonded - TUERCA To M4 UNION	Contact	Bonded	Closed	50,	3,5089e-014	0,	1,0723e-004	2,0866e-003	0,11478	85,
Bonded - TUERCA To M4 UNION	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	86,
Bonded - TUERCA To M4 UNION	Contact	Bonded	Closed	49,	9,9065e-014	0,	1,0718e-004	2,0865e-003	0,11478	87,
Bonded - TUERCA To M4 UNION	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	88,

Fuente : Elaboración propia

Bonded - TUERCA To M4 UNION
Bonded - TUERCA To M4 UNION
Bonded - TUERCA To M4 UNION
Bonded - TUERCA To M4 UNION
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR
Bonded - SUPERIOR TRASERA To M4 SUPERIOR
Bonded - INFERIOR TRASERA To M4 INFERIOR
Bonded - INFERIOR TRASERA To M4 INFERIOR
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Bonded - UNION To M4 UNION
Frictionless - INFERIOR DELANTERA To SUPERIOR DELANTE
Frictionless - INFERIOR DELANTERA To SUPERIOR DELANTE

Anexo 5. (Estado de contactos simulación de elementos finitos)

Anexo 6 (Iteraciones para convergencia de mallado)

Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total		
Férulas	Body Sizing	8	21468	53416	29952	0,063988		1
Uniones	Body Sizing	4			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1						
Caras de Agujeros	Face Meshing	2						
Caras Planas	Face Meshing	3						
Caras de Contacto	Face Meshing	3						
Varilla Superior	Sweep	10						
Varilla Inferior	Sweep	5						
Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	7	24791	59423	33175	0,062815	9,715146948	2
Uniones	Body Sizing	3,5			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1					Error Porcentual	
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,875						
Caras Planas	Face Meshing	2,6875						
Caras de Contacto	Face Meshing	2,6875						
Varilla Superior	Sweep	15						
Varilla Inferior	Sweep	8						
Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	5	39651	84578	38589	0,062524	7,214491176	4
Uniones	Body Sizing	2,5			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1						
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,625						
Caras Planas	Face Meshing	2,0625						
Caras de Contacto	Face Meshing	2,0625						
Varilla Superior	Sweep	25						
Varilla Inferior	Sweep	14						
Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	6	29558	67893	35805	0,062989	7,345342829	3
Uniones	Body Sizing	3			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1						
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,75						
Caras Planas	Face Meshing	2,375						
Caras de Contacto	Face Meshing	2,375						
Varilla Superior	Sweep	20						
Varilla Inferior	Sweep	11						

Fuente : Elaboración propia

Anexo 7.(Iteraciones para convergencia de mallado)

Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	4	60439	117444	43037	0,062309	10,33529289	5
Uniones	Body Sizing	2			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1						
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,5						
Caras Planas	Face Meshing	1,75						
Caras de Contacto	Face Meshing	1,75						
Varilla Superior	Sweep	30						
Varilla Inferior	Sweep	17						
Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	3	113231	198174	60214	0,061382	28,5265885	6
Uniones	Body Sizing	1,5			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	1						
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,375						
Caras Planas	Face Meshing	1,4375						
Caras de Contacto	Face Meshing	1,4375						
Varilla Superior	Sweep	35						
Varilla Inferior	Sweep	20						
Pieza	Comando de mallado	Tamaño de elemento	Numero de elementos totales	Numero total de nodos	Esfuerzo Máximo	Deformación Total	Error Porcentual	
Férulas	Body Sizing	2	330251	529986	61316	0,061152	1,797247048	7
Uniones	Body Sizing	1			Mpa	mm		
Tornillos y Tuercas	Body Sizing + Hex Dominant	0,75						
Caras de Agujeros	Face Meshing	1,25						
Caras Planas	Face Meshing	1,125						
Caras de Contacto	Face Meshing	1,125						
Varilla Superior	Sweep	40						
Varilla Inferior	Sweep	23						

Fuente : Elaboración propia

Anexo 8. (Tipos de estructuras para optimización Lattice)

Cubic (default)		Crossed	
Midpoint		Octahedral 1	
Octet		Octahedral 2	
Diagonal			

Fuente : [40]

Anexo 9. (Resultados de ANSYS Additive)

Pieza Optimizada	Posición	Distorsión Geométrica Max (mm)	Distorsión Geométrica Min (mm)	Esfuerzos Residuales Pa Max (mm)	Esfuerzos Residuales Min Pa (mm)
Unión	1	3,840	0,015282	26007,000	15,220
	2	1,676	0,000000	10629,000	36,714
	3	1,875	0,000000	21413,000	0,000
Superior Delantera	1	3,905	0,000334	14922,000	0,004
	2	5,263	0,000000	9605,300	0,000
	3	6,425	0,000043	14828,000	0,015
	4	5,242	0,000281	12032,000	0,010
Superior Trasera	1	3,335	0,004413	11537,000	4,207
	2	6,906	0,695780	22667,000	0,002
	3	4,339	0,001918	13785,000	0,017
	4	8,802	0,000344	19862,000	0,000
Inferior Delantera	1	4,450	0,006401	22031,000	6,271
	2	5,920	0,000985	15826,000	0,307
	3	6,681	0,020348	19488,000	17,747
	4	5,311	0,007955	21006,000	10,628
Inferior Trasera	1	4,555	0,000000	15796,000	0,000
	2	7,447	0,000000	33650,000	0,000
	3	5,047	0,000000	19902,000	0,000
	4	5,000	0,002549	18740,000	0,000

Fuente : Elaboración propia

Anexo 10. (Resultados ULTIMAKER CURA de elementos optimizados y sin optimizar)

Pieza Optimizada	Posicion	Tiempo	Material(Gramos)	Material (Metros)	Costo (Pesos)	Pieza Optimizada	Posicion	Tiempo	Material(Gramos)	Material (Metros)	Costo Total
N/A	N/A	43	5	1,53	516	Union	1	43	5	1,53	516
		39	5	1,66	545		2	39	5	1,66	545
		53	4	1,42	503		3	53	4	1,42	503
Superior Delantera	1	926	108	36,25	12039	Superior Delantera	1	1498	90	30,08	11377
	2	1050	135	45,18	14807		2	1538	108	36,08	13154
	3	916	107	36	11950		3	1496	89	29,97	11342
	4	929	119	40,03	13117		4	1496	103	34,41	12601
Superior Trasera	1	966	112	37,44	12453	Superior Trasera	1	1392	87	29,06	10886
	2	1025	128	43,07	14162		2	1490	107	35,98	13035
	3	977	112	37,57	12511		3	1419	88	29,43	11042
	4	930	116	38,97	12818		4	1391	94	31,64	11616
Inferior Delantera	1	364	44	14,6	4832	Inferior Delantera	1	611	36	11,92	4541
	2	359	43	14,48	4788		2	611	35	11,83	4516
	3	438	52	17,49	5792		3	671	44	14,86	5489
	4	372	46	15,29	5043		4	612	38	12,62	4742
Inferior Trasera	1	298	34	11,54	3839	Inferior Trasera	1	524	29	9,78	3769
	2	309	35	11,64	3888		2	545	31	10,4	3985
	3	340	40	13,35	4432		3	553	35	11,61	4343
	4	323	38	12,72	4221		4	599	33	11,1	4286

Fuente : Elaboración propia

Anexo 11. (Diferencia de tiempos material y costes entre componentes optimizados y sin optimizar)

Pieza Optimizada	Posicion	Dif Tiempo	Dif Material (Gramos)	Dif Material (Metros)	Dif Costos (Pesos)
N/A	N/A	0	0	0	0
		0	0	0	0
		0	0	0	0
Superior Delantera	1	572	-18	-6,17	-663
	2	488	-27	-9,1	-1653
	3	580	-18	-6,03	-608
	4	567	-16	-5,62	-516
Superior Trasera	1	426	-25	-8,38	-1567
	2	465	-21	-7,09	-1127
	3	442	-24	-8,14	-1468
	4	461	-22	-7,33	-1203
Inferior Delantera	1	247	-8	-2,68	-291
	2	252	-8	-2,65	-273
	3	233	-8	-2,63	-303
	4	240	-8	-2,67	-301
Inferior Trasera	1	226	-5	-1,76	-70
	2	236	-4	-1,24	97
	3	213	-5	-1,74	-89
	4	276	-5	-1,62	65

Fuente : Elaboración propia

Anexo 12. (Diferencia porcentual de tiempos material y costes entre componentes optimizados y sin optimizar)

Pieza Optimizada	Posicion	Dif Tiempo (Porcentual)	Dif Material (Porcentual)	Dif Material (Porcentual)	Dif Costos (Porcentual)
N/A	N/A	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
Superior Delantera	1	38,18	20,00	20,51	5,83
	2	31,73	25,00	25,22	12,57
	3	38,77	20,22	20,12	5,36
	4	37,90	15,53	16,33	4,10
Superior Trasera	1	30,60	28,74	28,84	14,39
	2	31,21	19,63	19,71	8,65
	3	31,15	27,27	27,66	13,30
	4	33,14	23,40	23,17	10,35
Inferior Delantera	1	40,43	22,22	22,48	6,40
	2	41,24	22,86	22,40	6,04
	3	34,72	18,18	17,70	5,52
	4	39,22	21,05	21,16	6,35
Inferior Trasera	1	43,13	17,24	18,00	1,85
	2	43,30	12,90	11,92	2,43
	3	38,52	14,29	14,99	2,04
	4	46,08	15,15	14,59	1,52

Fuente : Elaboración propia

Anexo 13. (Ponderación de resultados de ANSYS Additive y ULTIMAKER CURA para selección de mejor posición)

Pieza Optimizada	Distorsión Geométrica	Esfuerzos Residuales	Costos	Clasificación Acumulada	Posición Optima	Posición en orden
Unión	3	2	2	7	3	1
	1	1	3	5	1	2
	2	3	1	6	2	3
Superior Delantera	1	2	2	5	1	1
	4	1	4	9	4	2
	3	4	1	8	2	3
	2	3	3	8	2	4
Superior Trasera	1	1	1	3	1	1
	3	4	4	11	4	2
	2	2	2	6	2	3
	4	3	3	10	3	4
Inferior Delantera	1	4	2	7	2	1
	3	1	1	5	1	2
	4	2	4	10	4	3
	2	3	3	8	3	4
Inferior Trasera	1	1	1	3	1	1
	4	4	2	10	4	2
	3	3	4	10	4	3
	2	2	3	7	2	4

Fuente : Elaboración propia

