



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE COMPONENTES METÁLICOS
MEDIANTE LA SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DEL PROCESO
DE MANUFACTURA "POWDER BED FUSION"

ASESORES INTERNOS:

DRA. KARLA CAMARILLO GÓMEZ

M. C. GENARO RICO BAEZA

ASESOR EXTERNO:

DR. JOSÉ ANTONIO TORRES CASTILLO

PRESENTA: ING. HUGO ISAAC VALERIOS BERBER

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I. MARCO DE REFERENCIA	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Objetivos	18
1.4 Justificación.....	18
1.5 Alcances.....	19
1.6 Estado del arte	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Bobina de inducción	21
2.2 Manufactura aditiva	22
2.3 Powder Bed Fusion	23
2.3.1 Parámetros del proceso PBF	25
2.4 Método del elemento finito	31
2.5 Metodología de simulación PBF.....	34
2.6 Diseño de experimentos.....	41
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	45

3.1 Selección de factores y niveles de construcción Powder Bed Fusion	46
3.2 Selección y diseño de DOE.....	48
3.3 Simulación con MEF	49
3.3.1 Configuración de material	50
3.3.2 Preparación de modelo	53
3.3.3 Discretización	54
3.3.4 Configuración de parámetros de construcción	55
3.4 Análisis estadístico.....	55
CAPÍTULO IV ANÁLISI de RESULTADOS	57
4.1 Parámetros de proceso (Powder Bed Fusion) relevantes para la distorsión geométrica del inductor	58
4.2 Parámetros de proceso (Powder Bed Fusion) relevantes para los esfuerzos residuales en el inductor	61
CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS.....	66
ANEXOS	72

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes han brindado un apoyo incondicional desde el comienzo de mi carrera profesional. Siempre se han preocupado de que no me falte nada para alcanzar mis metas y completar este paso tan significativo en mi vida.

Agradezco de manera especial a mi esposa Sol, quien ha estado a mi lado en todo momento, brindándome su ayuda durante los momentos de incertidumbre a lo largo de estos dos años de preparación.

También quiero extender mi agradecimiento a mis profesores, cuyo apoyo y comprensión fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

Además, quiero reconocer y agradecer al CONAHCYT, que generosamente me otorgó una beca durante este periodo de posgrado. Su apoyo financiero ha sido fundamental para permitirme concentrarme por completo en mis estudios y realizar esta investigación.

Una vez más, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de una u otra manera en el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Eje de transmisión continua	15
Figura 2.1 Representación de bobina de inducción electromagnética	22
Figura 2.2 Clasificación de tecnologías de MA [4].....	23
Figura 2.3 Representación de cámara de construcción para proceso PBF.....	22
Figura 2.4 Representación de los principales en PBF	26
Figura 2.5 Efecto de deformación en pieza impresa [1]	28
Figura 2.6 Fractura a causa de esfuerzos residuales [1].....	29
Figura 2.7 Porosidad en pieza impresa [9]	29
Figura 2.8 Defectos por falta de fusión [19].....	30
Figura 2.9 Discretización de estructura de puente tipo armadura	32
Figura 2.10 Elemento tetraedro nodos en las aristas	32
Figura 2.11 Elemento hexaedro nodos en las aristas	33
Figura 2.12 Discretización A) elementos hexaédricos B) elementos tetraédricos	33
Figura 2.13 Discretización con elementos voxeles.....	34
Figura 2.14 Diagrama de flujo para realizar un análisis de elemento finito de manufactura aditiva	35
Figura 2.15 Selección de orientación de modelo de prótesis A) horizontal paralelo a dirección de repintado B) horizontal perpendicular a dirección de repintado C) Vertical con cabeza abajo D) vertical con cabeza arriba	37
Figura 2.16 Discretización de modelo de simulación PBF.....	37
Figura 2.17 Probeta en voladizo para calibración	39
Figura 2.18 Definición de matriz ortogonal L18 bajo metodología de Taguchi [31].....	42
Figura 3.1 Metodología general de proyecto	45
Figura 3.2 Bobina de inducción electromagnética.....	50
Figura 3.3 Conductividad térmica de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [39]	51
Figura 3.4 Calor específico de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [40]	52

Figura 3.5 Coeficiente de expansión térmica de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [39]	52
Figura 3.6 Comportamiento plástico térmica de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [41,42]	53
Figura 3.7 Modelo de simulación para análisis de elemento finito	54
Figura 3.8 Mallado de la pieza con elementos tipo Voxel	55
Figura 4.1 Resultados finales. a) deformación total, b) esfuerzo residual	55
Figura 4.2 Visualización de distintos valores de distancia entre cordones de soldadura	59
Figura 4.3 Resultados de simulación de distorsión. a) simulación #3 y b) simulación #4	57
Figura 4.4 Relación Señal-ruido para respuesta de deformación.....	60
Figura 4.5 Resultados finales de esfuerzos residuales. a) simulación #3, b) simulación #4	61
Figura 4.6 Relación Señal-ruido para respuesta de esfuerzos residuales	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros de construcción para condiciones de simulación	38
Tabla 3.1 Acotamiento de valores en función de las características de máquina	46
Tabla 3.2 Factores y niveles seleccionados para para DOE	47
Tabla 4.1 Respuesta para relación señal a ruido de resultados de deformación	60

RESUMEN

En la última década, la manufactura aditiva (MA) se ha convertido en un proceso de fabricación altamente utilizado en la industria debido a su capacidad de crear piezas con geometrías complejas. El método Powder Bed Fusion (PBF) es uno de los más utilizados para la fabricación de piezas metálicas, siendo el costo de producción de piezas y la falta de repetibilidad geométrica entre piezas algunas de las desventajas. Para ello, es de suma importancia determinar los parámetros de operación ideales del proceso de impresión que eviten errores de construcción. En este trabajo, se estudió el proceso de manufactura aditiva PBF mediante simulación numérica utilizando el método de elementos finitos (FEM) en conjunto con un diseño de experimentos de Taguchi (DOE), con la finalidad de establecer los parámetros del proceso de MA ideales para minimizar las deformaciones y esfuerzos residuales en una bobina de inducción electromagnética construida con la aleación $CuCr1Zr$. Basado en datos reportados en la literatura, se construyó una matriz L18 utilizando como factores la potencia (P), velocidad de escaneo (V), distancia entre cordones de soldadura (h) y ancho de capa (t). Los análisis estadísticos mostraron que la potencia y velocidad de escaneo fueron los factores más relevantes para las deformaciones y esfuerzos residuales. La deformación mínima obtenida en las simulaciones fue de 2.441 mm y el esfuerzo residual mínimo fue de 459 MPa , utilizando $P = 300\text{ W}$, $V = 700\text{ mm/s}$, $h = 0.13\text{ mm}$ y $t = 0.8\text{ mm}$ indicando que es posible realizar la impresión de la pieza obteniendo una deformación permisible y sin ocasionar fracturas ya que los esfuerzos residuales no superaron el límite de fluencia del material.

ABSTRACT

In the last decade, additive manufacturing (AM) has become a highly utilized manufacturing process in the industry, due to its ability to create parts with complex geometries. The Powder Bed Fusion (PBF) method is one of the most used for manufacturing metal parts. One of the disadvantages of this manufacturing method is the production cost of parts and the lack of geometric repeatability between pieces. Therefore, it is of utmost importance to decide the optimal operation parameters of the printing process to avoid construction errors. In this work, the PBF additive manufacturing process was studied through numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) in conjunction with a Taguchi design of experiments (DOE), to establish the ideal AM process parameters to minimize deformations and residual stresses in an electromagnetic induction coil constructed with the *CuCr1Zr* alloy. Based on data reported in the literature, an L18 matrix was constructed using power (P), scanning speed (V), hatch distance (h), and thickness layer (t) as factors. Statistical analyses showed that power and scanning speed were the most relevant factors for deformations and residual stresses. The minimum deformation obtained in the simulations was 2.441 mm , and the minimum residual stress was 459 MPa , using $P = 300\text{ W}$, $V = 700\text{ mm/s}$, $h = 0.13\text{ mm}$, and $t = 0.8\text{ mm}$, indicating that it is possible to carry out the printing of the piece while achieving an allowable deformation and without causing fractures, as the residual stresses did not exceed the material's yield limit.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías que conforman la industria 4.0 han tomado un impulso en los últimos años, como el internet de las cosas, big data, machine learning, manufactura aditiva (MA), inteligencia artificial entre otras.

La MA se encuentra dentro de las tecnologías de esta revolución tecnológica debido a que representa un avance con respecto a la forma de crear nuevos procesos para fabricar piezas que son imposibles con la manufactura convencional.

El proceso inducción electromagnética ha tomado la MA como uno de los principales procesos de fabricación para las bobinas de inducción [1], debido a la facilidad de creación de piezas complejas con las cuales el direccionamiento del campo electromagnético se ve mejorado, principalmente por los conductos internos necesarios para la refrigeración.

El controlar el proceso de construcción de MA implica incrementar la mejora de los productos que se fabrican, y disminuir los tiempos de fabricación y los errores de construcción. Para lo anterior, es necesario implementar herramientas como análisis y control del proceso, conocimiento del impacto de las variables de manufactura y la implementación de herramientas de simulación.

La simulación de los procesos de MA es un punto indispensable de la metodología de construcción de MA, ya que su aplicación crearía procesos con bajo nivel de riesgo desde la primera vez.

Este trabajo de tesis muestra las características necesarias para poder realizar la simulación de elemento finito del proceso de MA, aplicando un diseño experimental en una pieza de interés que necesariamente se requiere fabricar por MA.

En los capítulos I y II se presentan los aspectos teóricos de los que parte la investigación, así como los resultados que se pretenden alcanzar.

Dentro del capítulo III se describen todos los pasos que se siguieron, desde la investigación y definición de los parámetros a estudiar, hasta la obtención de cada uno de los resultados de las simulaciones.

El capítulo IV presenta los resultados tanto de las simulaciones como del análisis estadístico de los parámetros basado en el modelo estadístico de Taguchi.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo de tesis.

CAPÍTULO I. MARCO DE REFERENCIA

1.1 Antecedentes

La industria Automotriz es una de las más importantes a nivel mundial, en ella se encuentran diversas áreas de la ingeniería como el diseño, la manufactura, ciencia de los materiales, entre otras [2].

Un vehículo automotriz conlleva una gran cantidad de componentes y sistemas que en conjunto realizan la función de movilidad, por ejemplo, el sistema de potencia o motor de combustión interna, el sistema motriz, el sistema eléctrico, el sistema de dirección y frenado, los sistemas de seguridad, o incluso en automóviles más modernos, los sistemas de inteligencia artificial para conducciones autónomas.

Dentro del sistema motriz, se encuentra varios subsistemas como los ejes de transmisión continua, la caja de velocidades o el sistema del diferencial. Todo en conjunto, logra que la potencia generada por el motor llegue al neumático con la menor cantidad de pérdidas de potencia [2,3].

El sistema de eje de transmisión que se muestra en la figura 1.1, o también conocida como flecha de velocidad constante, es el encargado directo de transmitir el movimiento o la potencia a las ruedas.

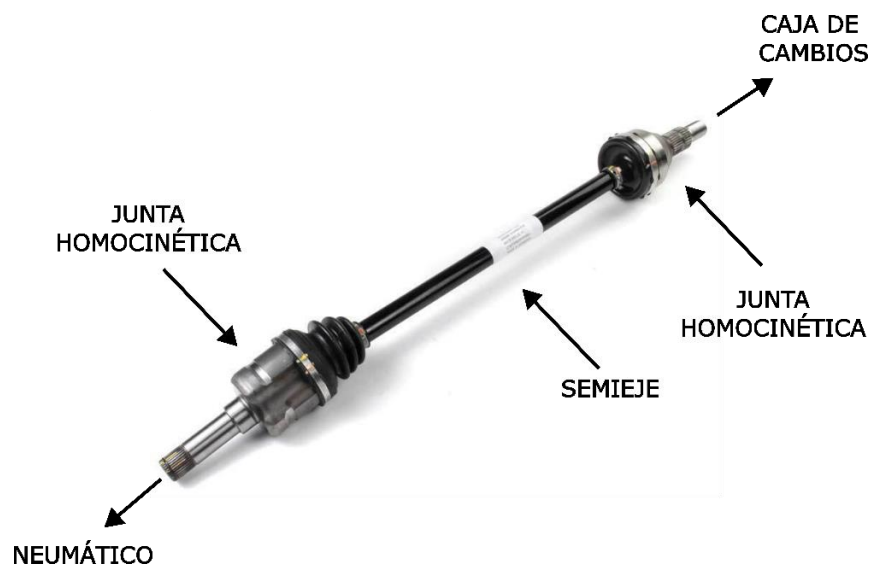


Figura 1.1 Eje de transmisión continua

El eje de transmisión continua debe ser capaz de transmitir el movimiento sin pérdidas considerando los cambios axiales y longitudinales por efecto de la dirección del neumático. Esto es posible por la junta homocinética, que es una unión articulada permitiendo el cambio de ángulo entre las conexiones externas y el semieje [2].

Todos los componentes que conforman al eje deben soportar los ciclos de carga y descarga de potencia del motor, por lo que, las características mecánicas deben ser la ideales para que soporten todo el ciclo de vida [3].

En GKN Automotive Celaya se utiliza el calentamiento por inducción magnética para lograr el tratamiento térmico en piezas del eje de transmisión continua, y con ello, la dureza superficial de estas piezas aumenta. Este calentamiento surge cuando se induce una corriente eléctrica en la pieza a través de un campo magnético generado por una bobina llamada inductor. El inductor genera el campo magnético al hacer pasar una corriente eléctrica a través de las espiras que conforman la bobina, y dependiendo de la geometría que tenga la bobina, el campo magnético será dirigido o inducido a la pieza a tratar térmicamente; lo anterior hace que la construcción de estas sea una tarea muy delicada.

En ocasiones, las geometrías de los inductores son muy complicadas para fabricarse por métodos convencionales, por ello, es necesario utilizar métodos de construcción capaces de fabricar estas piezas. En la fabricación convencional, los inductores están contruidos de varias piezas; éstas se unen entre sí mediante soldadura y su fabricación varía dependiendo de la pieza que lo conformen (postes, aros o bases). Generalmente, los postes son barras de material cortados con una longitud específica, y después son barrenados para poder crear el conducto interno de refrigeración. Los aros pueden ser fabricados por tubos de sección cuadrada o redonda, doblados a mano siguiendo formas ya fabricadas o aros maquinados con sección que se adapta a la pieza a temprar. Mientras que, las bases pueden ser placas cuadradas que tienen maquinados en los que se soportarán los postes y los aros, y, por otro lado, el soporte para máquina de inducción electromagnética.

Estos métodos de construcción disminuyen la eficiencia de conducción de corriente eléctrica por efecto de las uniones de soldadura y los distintos ángulos para unir cada pieza; además, la vida útil del inductor se ve afectado por la poca factibilidad de

construcción del conducto interno del inductor para que el refrigerante fluya de manera constante, disminuyendo la temperatura del inductor. Finalmente, las geometrías obtenidas de los inductores afectan la generación del campo electromagnético dificultando así la generación de la capa de templado.

Con la impresión 3D o MA, es posible generar geometrías complejas. Específicamente, utilizando el proceso de *Powder Bed Fusion* (PBF) para imprimir piezas de metal, es posible construir los inductores con la geometría adecuada para cada número de parte que se vaya a tratar térmicamente.

1.2 Planteamiento del problema

En el proceso de temple por inducción, los herramientas conocidos como inductores, deben tener tolerancias geométricas muy cerradas para cumplir con los estándares de calidad especificados por el cliente, por ello, su construcción debe seguir un proceso estandarizado que cumpla con las dimensiones de diseño. Actualmente, la mayoría de los procesos de construcción de los inductores se realiza mediante métodos convencionales como pueden ser torneados, fresados, piezas soldadas y tubos doblados a mano con formas requeridas. Estos métodos implican altos tiempos de fabricación y geometrías condicionadas a las limitaciones de estos procesos de fabricación.

Al utilizar inductores impresos en MA se tiene un proceso de fabricación estandarizado y optimizado, con menos errores dimensionales y geometrías adaptadas a las piezas a temprar.

En el proceso de MA, los parámetros de operación dependen de la geometría de la pieza a imprimir y del material base. Para determinar los parámetros ideales de impresión, se deben realizar diversas pruebas variando los parámetros de operación. Otra opción, es utilizar software especializado para realizar simulación del proceso de MA y así poder encontrar la combinación de parámetros ideales sin la necesidad de realizar piezas físicas y, con ello, reducir el desperdicio de material. Utilizando un diseño de experimentos en conjunto con las simulaciones, es posible conocer el impacto de cada una de las variables en el proceso, para así poder fabricar los inductores cumpliendo con las dimensiones de diseño.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una metodología para el proceso de manufactura aditiva Powder Bed Fusion aplicada a inductores para establecer los parámetros de proceso correctos, mediante un diseño de experimentos y simulación por el método de elemento finito.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Conocer los procesos y limitaciones que conforman el proceso de MA PBF mediante investigación en literatura, para establecer el diseño de un inductor.
- Seleccionar los parámetros de construcción de MA que estén directamente relacionados con la pieza construida para aplicarlos en un diseño de experimentos.
- Realizar simulaciones del diseño experimental mediante el método de elemento finito para determinar el parámetro de mayor influencia en el proceso de MA.
- Determinar el rango óptimo de operación de los parámetros del proceso PBF mediante método estadístico para así minimizar las deformaciones y esfuerzos residuales de construcción en la pieza.

1.4 Justificación

El tiempo ciclo en la línea de fabricación de un componente del eje de transmisión, se ve afectado mayormente en la fase del tratamiento térmico. Este paso es el más crítico, debido al tiempo del proceso y los errores de calidad.

Actualmente, se utilizan inductores fabricados de manera convencional, los cuales presentan complicaciones de manufactura, mantenimiento y primera puesta a punto en línea de producción. Utilizando este tipo de inductores, es necesario un proceso de prueba y error para obtener la capa de temple requerida por el fabricante, razón por lo cual se presentó la propuesta de migrar a inductores fabricados por MA.

Los inductores fabricados por MA presentan una disminución en los parámetros del tratamiento térmico en comparación con un inductor fabricado de manera convencional. Además, se realizaron los primeros prototipos de inductores impresos en 3D mediante un proveedor externo y acorde a los datos de puesta a punto de un mismo número de parte, se observa una disminución de 18% en la potencia y 14% en la frecuencia requerida por el generador, además de un 4.5% menos del tiempo de calentamiento. De igual manera, la capa efectiva de temple se ve mejorada con inductores fabricados por MA al tener una geometría que se adapta más a la pieza a temprar, induciendo un campo magnético mejor dirigido.

Todos estos beneficios están en función de calidad de la impresión, por lo tanto, se debe tener un proceso de impresión de MA estandarizado y optimizado, con el fin de obtener piezas sin porosidades y con geometrías y dimensiones lo más cercanas a los diseños 3D.

1.5 Alcances

Se realizará un diseño experimental aplicado a simulaciones por elemento finito del proceso PBF, para obtener la relación que existe entre los principales parámetros de construcción, analizando los resultados de distorsión y esfuerzos residuales. Se obtendrá la combinación de los parámetros donde se generan los menores errores de construcción.

1.6 Estado del arte

Desde sus inicios, en 1986 por Charles W. Hull [4], la impresión 3D o MA es considerada una tecnología revolucionaria. La MA se define como “el proceso de unir materiales para hacer objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente, capa sobre capa, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractiva” [5]. Para la MA se pueden utilizar distintos materiales y para cada uno de ellos, existe un tipo de proceso de consolidación. Uno de los principales materiales utilizados para la MA es el filamento de polímeros, utilizando un proceso de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en ingles), aunque el método más utilizado comercialmente es la

estereografía que utiliza como materia prima resina líquida sensible a la luz ultravioleta, por lo cual se utiliza un láser para ser solidificada [6].

Aunque se han realizado investigaciones muy importantes en el área de MA aplicada a polímeros, este tipo de MA es usado para realizar prototipos que ayudan con la validación de un diseño antes de continuar con el proceso de fabricación.

En cambio, la MA aplicada a metales ha tomado mucha importancia en la industria, principalmente, en el área aeroespacial y médica, por brindar piezas con geometrías complicadas y materiales muy ligeros y resistentes [4].

Uno de los principales problemas que se enfrenta la MA son las distorsiones geométricas generadas por factores de construcción. Las distorsiones se presentan principalmente por los esfuerzos residuales que se generan en las piezas por los cambios bruscos de temperatura que sufre el material para poder ser fusionado y consolidado [7]. En Dilip et al. [8], se comenta que las porosidades en las piezas por una falta de fusión del material es uno de los principales defectos durante el proceso de MA para metales, dando paso a microgrietas o fracturas por falla a la fatiga, y asocia este tipo de problema con las velocidades altas de escaneo para fusionar el material. Otro iniciador de porosidades y grietas, son las altas velocidades de enfriamiento una vez terminada la impresión de las piezas. Este problema se puede disminuir si se tiene una cámara de impresión con temperatura controlada e ir reduciéndola gradualmente hasta llegar a la temperatura ambiente [9]. La calidad del material utilizado también representa un problema para la MA con metales, ya que si presentan impurezas pueden generar porosidades por gases atrapados [10].

Las aleaciones de Titanio y Cobre son las más utilizadas como materia prima en la MA con metales, ya que, para el caso de las aleaciones de Titanio [11], son muy ligeros y resistentes, mientras que, para el caso de las aleaciones de Cobre [10], presentan buena conductividad eléctrica y térmica. Sin embargo, para las aleaciones de cobre, se presenta un problema extra, ya que la potencia del láser se ve afectada por reflexión que causa el cobre. Entonces, la potencia suministrada no es el 100 % de lo establecido en la configuración para realizar la fusión [12].

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo muestra las definiciones técnicas y científicas relacionadas con los temas que se toman como referencia para realizar la presente investigación.

Se pueden encontrar temas relacionados en su mayoría con la MA y su enfoque hacia la simulación del proceso, las razones por que se realiza una experimentación del proceso y, la técnica empleada para desarrollarlo.

2.1 Bobina de inducción

Dentro de los procesos de tratamientos térmicos que se aplican a los metales para mejorar sus propiedades mecánicas, se encuentra el proceso de templado por inducción electromagnética, que es uno de los más utilizados por su rápida aplicación a las piezas [13].

Este proceso de basa en la aplicación de calor en la pieza para elevar su temperatura, seguida de un enfriamiento rápido; puede realizarse en menos de un minuto dependiendo del tamaño de la pieza que se esté tratando [14].

La aplicación de calor hacia las piezas se realiza por el calentamiento óhmico generado por un flujo de corriente alterna; ésta corriente se conoce como corrientes de Eddy y son inducidas por un flujo magnético variable siguiendo la ley de Faraday [15]. La figura 2.1 es una representación del funcionamiento de una bobina de inducción electromagnética.

Este método puede controlar la zona específica del calentamiento de las piezas, su temperatura máxima y el tiempo necesario para lograrlo. Existen diversas geometrías para la construcción de una bobina de inducción electromagnética dependiendo de la zona de calentamiento.

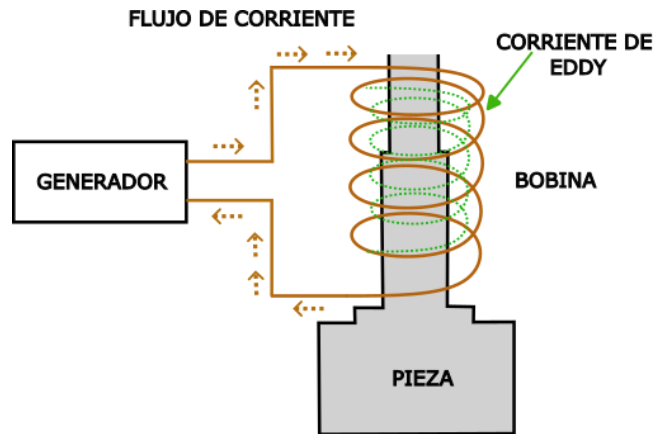


Figura 2.1 Representación de bobina de inducción electromagnética

2.2 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva se ha convertido en uno de los procesos más revolucionarios de las últimas décadas, debido a su versatilidad para crear piezas con geometrías complejas en corto tiempo [16].

La MA fue iniciada en 1986 por Charles W. Hull quien creó el primer proceso de prototipado rápido mediante la técnica de estereolitografía [4]. Esta tecnología se utilizaba para crear piezas de ayuda para que los ingenieros verificaran sus modelos finales, utilizando este método que era rápido, barato y con la posibilidad de crear casi cualquier geometría. Con el paso de los años, se ha convertido no solo en un método de prototipado rápido, sino en un proceso de manufactura con la capacidad de construir piezas que puedan soportar distintos procesos industriales [6].

La primera y gran diferencia de la MA y la manufactura convencional es que se basan en metodologías contrarias. Esto crea la ventaja de la MA para crear piezas desde un punto de vista de adentro hacia afuera, a diferencia de la manufactura convencional que es de afuera hacia adentro. Además, es más factible crear piezas con geometrías complejas [17].

Para la MA existen distintos métodos que se basan en diferentes tecnologías para lograr que el material se adhiera para así formar piezas sólidas. Cada uno de estos métodos utiliza distintos materiales como polímeros, metales, cerámicos o madera. En la figura 2.2 se puede observar la clasificación de las distintas tecnologías para la MA en función del estado de la materia prima que se utiliza.

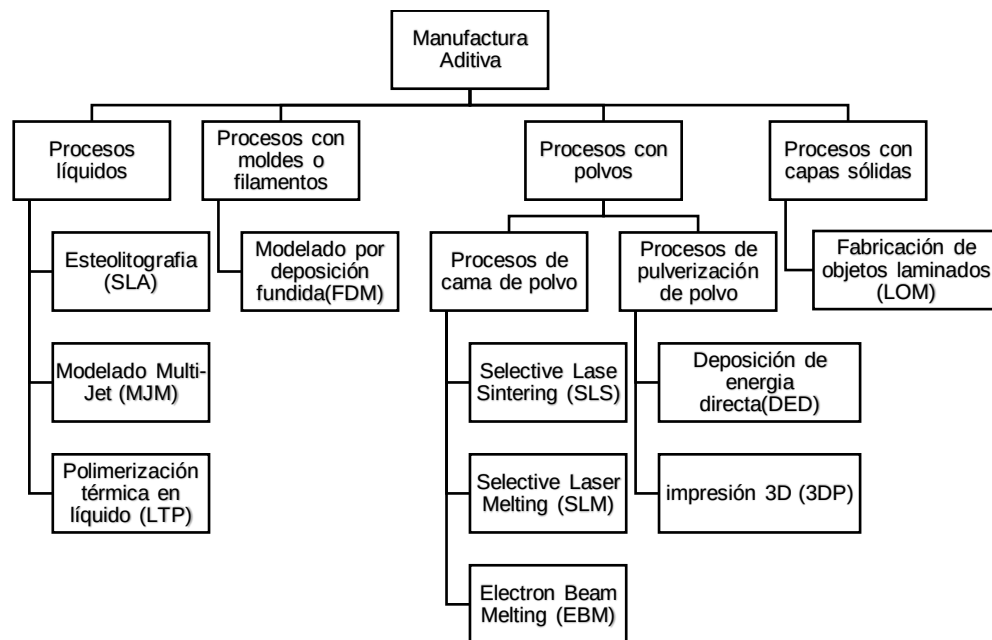


Figura 2.2 Clasificación de tecnologías de MA [4]

Las tecnologías más utilizadas son aquellas que se basan en polímeros como los procesos con líquidos, filamentos o capas sólidas. Estos procesos abarcan hasta un 46% del mercado de la MA, ya que en su gran mayoría son utilizados para la creación de prototipos de bajo costo. En segundo lugar, con un 40% se encuentran las tecnologías que utilizan como materia prima a los metales. Estos procesos han tomado mucha importancia en la industria, ya que son capaces de crear piezas funcionales [16].

2.3 Powder Bed Fusion

De todas las tecnologías que abarca la MA, de las más importantes para la industria, son las que utilizan materiales metálicos. Con estas tecnologías es posible crear piezas que pueden ser utilizadas en distintos procesos industriales o tareas para soportar distintas cargas.

PBF es una tecnología que se basa en la fusión del material para que este se pueda unir y así formar una pieza tridimensional. Con esta tecnología es posible crear piezas sólidas con densidades relativas muy cercanas a piezas creadas con otros procesos de manufactura como forjados, maquinados o métodos de fundición [18].

Este proceso utiliza un láser de alta potencia como fuente de energía para lograr la fusión del material. La materia prima es material metálico en polvo que van desde los 10 a 100 μm de tamaño, generalmente, con geometrías esféricas. La geometría y el tamaño del material está condicionado por el proceso de producción del material [7]. La construcción de las piezas se realiza sobre una placa de construcción la cual soportes tanto la pieza que se está construyendo como el material que no se está utilizando. Esta placa es la que tiene el movimiento de maneta vertical para así dar el tamaño de las capas de impresión.

Todos estos elementos se encuentran dentro de la cámara de construcción hermética, en su interior, la temperatura debe ser controlada; además, se utilizan gases para lograr disminuir la cantidad de Oxígeno, generalmente, Argón o Zenón. En la figura 2.3 se pueden observar los elementos y su distribución típica para el proceso de PBF.

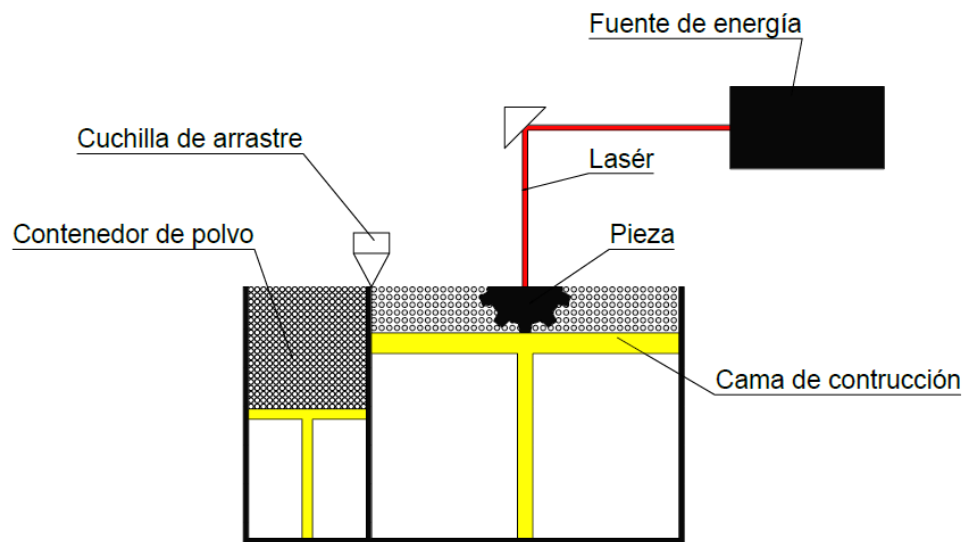


Figura 2.3 Representación de cámara de construcción para proceso PBF

El proceso de PBF se basa en las siguientes tres etapas de construcción:

- **Aplicación de capa de material:** En esta primera etapa la cuchilla de arrastre realiza el recorrido en dirección horizontal a la placa de construcción, para generar una capa de polvo por en sema de la cama de construcción.
- **Escaneo:** Cuando la cuchilla regresa a su posición inicial, inicia el escaneo del láser. El láser realiza un recorrido que corresponde a la geometría de la pieza

que se está construyendo. El láser hace que el material se funda y se consolida con el material a su alrededor, generando así una pieza sólida.

- **Desplazamiento de cama de construcción:** En esta etapa, la maca de construcción realiza un desplazamiento en dirección vertical a la cama de construcción. Esta distancia que se desplaza corresponderá al ancho de capa, la cual es una característica de todos los procesos de MA.

Estas etapas serán iterativas hasta que la pieza de interés se haya terminado de construir.

2.3.1 Parámetros del proceso PBF

Como en todos los procesos de construcción o de manufactura, existen parámetros que controlan las condiciones en las que se realizan. Para la MA, estos parámetros resultan muy importantes ya que impactan directamente al acabado de las piezas.

Se consideran como de mayor importancia aquellos que controlan directamente la construcción de las piezas, ya que de ellos depende la forma en la que se fusiona, se solidifica y se comporta térmicamente durante todo el proceso.

Estas condiciones están regidas por la cantidad de energía suministrada al polvo para lograr la fusión. La relación que existe entre los principales factores de construcción que influyen en la energía suministrada está dada por:

$$E = \frac{P}{t \cdot V \cdot h} \quad (2.1)$$

donde E es la densidad de energía dada en J/mm, P es la potencia suministrada por el láser, t es el ancho de la capa de material, V es la velocidad de escaneo del láser y, h es el espaciamiento entre pistas de escaneo.

La relación de estos parámetros se describe en la figura 2.3, en donde se puede observar cómo es que se construyen las pistas y capas de soldadura, que a su vez forman toda la pieza.

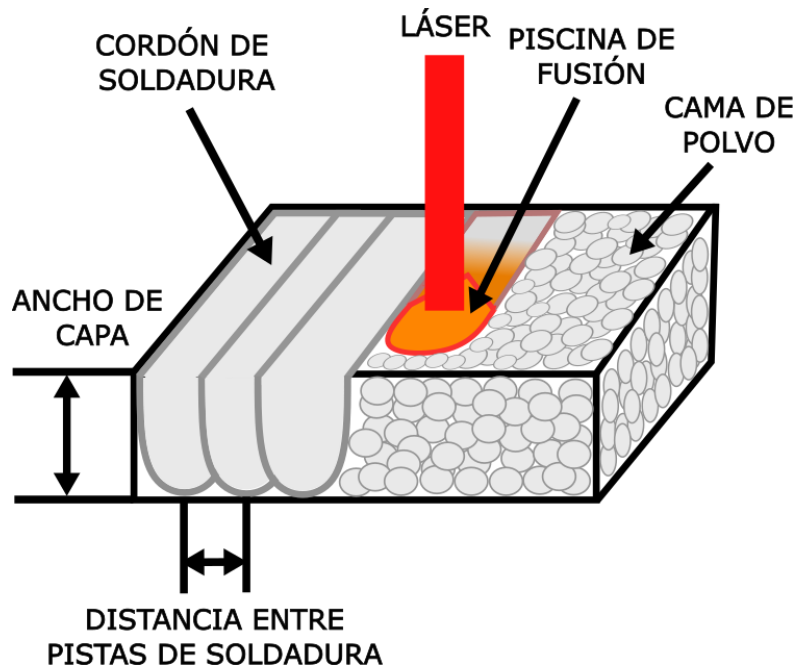


Figura 2.4 Representación de los principales en PBF

Cada uno de estos parámetros son independientes entre sí, y representan el siguiente comportamiento físico en la cámara de construcción:

- **Potencia (P):** Se puede definir a la potencia del láser como la intensidad con la cual la luz golpea las capas de polvo para poder aumentar su temperatura y con ello lograr la fusión. La unidad de medida es el Watt.
- **Ancho de capa (t):** Como se define a la MA, este proceso de basa en la aplicación de distintas capas de material para que éste se adhiera. Estas capas de material tendrán un tamaño en específico dependiendo de la tecnología que se esté utilizando, la cantidad de material que se requiera aplicar, la calidad de las piezas a imprimir o incluso el tiempo que se requiera para realizar la impresión. Está directamente relacionado con la calidad de las piezas a imprimir ya que, a menor ancho de capa, la calidad de las piezas aumenta, debido a que se tendrá una transición más suave de las geometrías. La unidad de medida es en mm.
- **Velocidad de escaneo (V):** Esta es la velocidad en la que el láser se moverá por toda la geometría de la capa para realizar el escaneo del material y con ello

logar la fusión de este. Generalmente, esta velocidad va desde los 100 hasta los 1000 mm/s.

- **Espaciamiento entre pistas de soldadura (h):** Corresponde a un tamaño de capa vertical, el espaciamiento entre pistas o *hatch distance* en inglés, corresponde a una distancia de manera horizontal que recorre el láser para crear los distintos cordones de soldadura. La unidad de medida es en mm.

Existen a su vez otros parámetros que interfieren con la construcción de la pieza como la estrategia de escaneo, la temperatura de la cámara y la placa de construcción, la orientación de construcción, el tamaño de las partículas del material a utilizar la velocidad de repintado, entre otros.

Estos se pueden considerar como parámetros secundarios ya que no interactúan con la fusión del material, pero de igual manera impactan en el acabado de la pieza.

2.3.2 Imperfecciones de piezas impresas

La MA aún sigue siendo un proceso costoso y complicado de realizar si no se tiene la suficiente experiencia y un proceso calibrado para la pieza que se fabricará. Existen varios problemas que se pueden presentar durante el proceso o después de que la pieza ya se considera como terminada, entre los más importantes se encuentran los siguientes:

- **Deformación:** El principal defecto que se presenta en la MA son las distorsiones o deformaciones. Estas deformaciones en las piezas pueden ser causadas por distintos factores, el principal de ellos son los altos gradientes de temperatura que sufre el material al momento en que el láser incide en él. A causa de este cambio tan brusco de la temperatura del material, este se expande y se contrae durante el cambio de fase, de manera se pueden provocar deformaciones plásticas que impactan en las dimensiones finales de la pieza. En la figura 2.5 se puede observar cómo es que la pieza se desprende de los soportes por efecto de una deformación excesiva.



Figura 2.5 Efecto de deformación en pieza impresa [1]

Las deformaciones pueden presentarse durante el proceso o al final de este, cuando la pieza inicia su etapa de enfriamiento. Si las deformaciones ocurren durante el proceso de construcción existen la posibilidad de que la cuchilla de repintado y la pieza choquen y pueda provocar daños a la máquina impresora.

- **Esfuerzos residuales:** Al igual que las deformaciones, los esfuerzos residuales son causados por los altos gradientes de temperatura durante el proceso de escaneo. Los esfuerzos residuales son tensiones internas que quedan cuando el material ya está completamente sólido, y estos a su vez, pueden causar otros problemas como deformaciones o que las piezas sufran fractura o fisuras si la cantidad de esfuerzos supera los límites el límite de fluencia del material. En la figura 2.6 se puede observar cómo es que la pieza se fractura a causa de esfuerzos residuales.

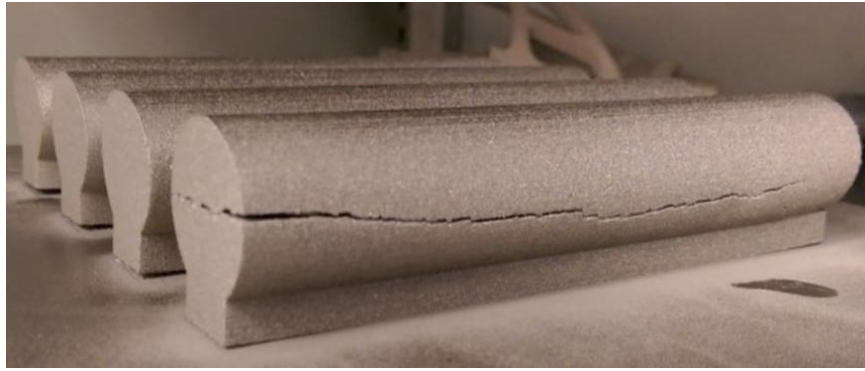


Figura 2.6 Fractura a causa de esfuerzos residuales [1]

Los esfuerzos residuales son un efecto inherente al sistema de MA mediante PBF. La cuestión es poder mantenerlos en los niveles más bajos para que las piezas no sufran fractura durante el proceso de construcción. Después es necesario un proceso final de tratamiento térmico, con el fin de poder disminuir o eliminar por completo sus efectos negativos en las piezas.

- **Porosidades:** Al ser un proceso de unión de finas capas de material en polvo, existe la posibilidad de que se creen imperfecciones en las piezas impresas creando pequeños espacios sin material soldado como las que se muestran en la figura 2.7, a esto se le conoce como porosidad. Existen dos mecanismos por los cuales se pueden crear estos defectos, el primero de ellos se conoce tal cual como poro. Estos se pueden identificar por que se forman de manera esférica y tienden a tener tamaños aproximados de hasta 100 μm . Estos poros son provocados por gas atrapado durante la fusión del material. Este gas puede ser evaporación del material por exceso de potencia del láser.

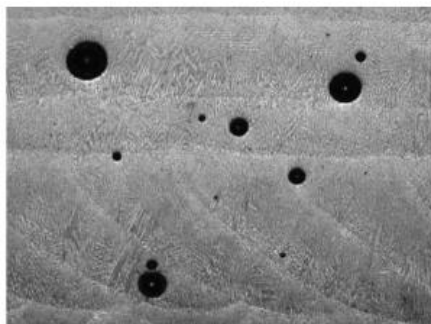


Figura 2.7 Porosidad en pieza impresa [9]

El segundo mecanismo de porosidad es llamado LOF (falta de fusión, por sus siglas en inglés), y ocurre cuando la potencia del láser no es lo suficiente para elevar la temperatura del polvo hasta la fusión. Se pueden identificar estos defectos con geometrías como se observa en la figura 2.8 y tienen dimensiones mayores a los poros esféricos. Estos defectos se pueden generar principalmente en las zonas de unión de pistas de soldadura y capas de material, ya que no se generó el sobre empalme del material.

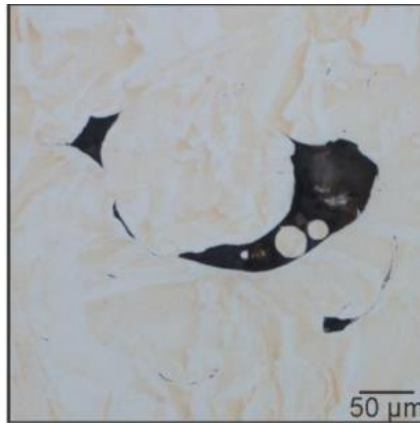


Figura 2.8 Defectos por falta de fusión [19]

Todos estos defectos impactan directamente en las características de trabajo de las piezas impresas, por ejemplo, se ha observado que las porosidades disminuyen considerablemente la conductividad eléctrica de las piezas impresas que, aunque esta característica siempre será menor en comparación a una pieza creada por otro método de manufactura, si es posible obtener valores muy cercanos [1].

Además de los mecanismos de falla que se han mencionado, el acabado superficial puede presentar un problema en las piezas impresas. La rugosidad también afecta de manera negativa a la conductividad eléctrica de las piezas, en donde a mayor rugosidad, las piezas tendrán menor conductividad eléctrica. La resistencia a la tracción se ve afectado de igual manera por la rugosidad resultante. Se encontró la correlación de la rugosidad en el acabado superficial con una disminución en la resistencia mecánica de las probetas [19].

2.4 Método del elemento finito

En mecánica y la física existen distintos métodos para resolver un problema: el método de la partícula, cuerpo rígido, cuerpo deformable y el método de elementos finitos. La aplicación de cada uno de ellos dependerá de la complejidad de los cuerpos implicados o los comportamientos físicos que se deseen estudiar.

El método de elementos finitos (MEF) se utiliza para poder estudiar problemas complejos utilizando enfoques de problemas discretos, es decir, utilizando los mismos conceptos matemáticos que se utilizaría para resolver problemas por cualquier otro método [20].

El MEF surgió de la década de los 40's para resolver problemas estructurales utilizando elementos lineales simples representándolos como unidimensionales, dividiendo el cuerpo de interés en pequeños cuerpos con el fin de disminuir la complejidad geométrica [21].

Con el paso de los años esta técnica se empezó a fortalecer añadiendo más parámetros con el fin de resolver problemas que involucrarán geometrías más complejas y mayor cantidad de fuerzas y reacciones a calcular. Esto ocasionó que la cantidad de ecuaciones a resolver fuera impráctico para su uso, hasta la llegada de las computadoras y su uso para realizar grandes cálculos matemáticos. El uso de este método se fue popularizado y estudiando hasta llegar a ser uno de los métodos más importantes para resolver problemas ingenieriles.

Como se comentó con anterioridad, este método consiste en dividir el cuerpo de interés en cuerpos más pequeños llamados elementos, a esto se le conoce como discretización. Cada uno de estos elementos se une con otros a su alrededor mediante puntos llamados nodos. Estos dos conceptos son los pilares para poder definir un problema. La figura 2.9 se presenta un problema típico de discretización utilizando elementos unidireccionales para poder representar la estructura del puente que se observa en la figura 2.9 b).

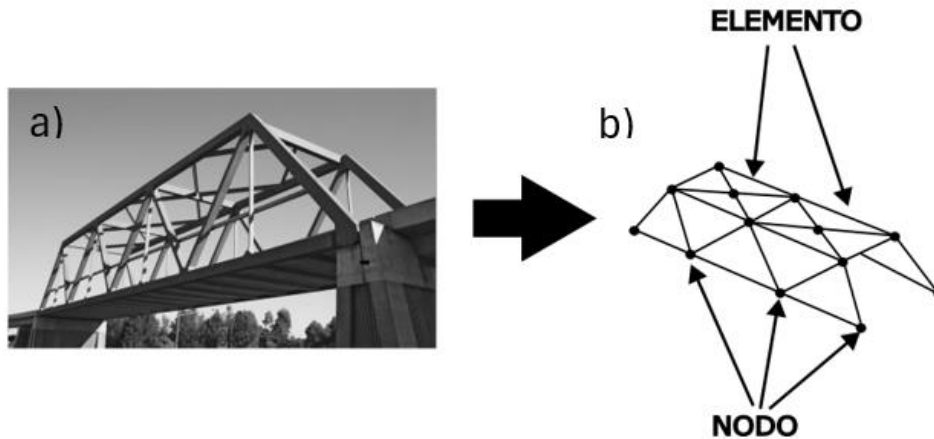


Figura 2.9 Discretización de estructura de puente tipo armadura a) estructura física b) discretización

Al realizar esta discretización, el problema matemático descrito por ecuaciones complejas, que generalmente son ecuaciones diferenciales, a un problema matricial. Esto ocasiona que sea resuelto por aproximación numérica.

Hoy en día con el MEF es posible resolver problemas estáticos, dinámicos, eléctricos, térmicos, problemas de fluidos o problemas en los que se puedan presentar distintos fenómenos físicos como MA.

Para estos problemas más complejos, no es posible el uso de elementos unidimensionales, para lo cual existen distintos tipos de elementos con los cuales es posible realizar las discretizaciones. A continuación, se mencionan estos elementos:

- **Tetraedro:** Estos elementos son cuerpos tridimensionales con cuatro caras triangulares como se muestra en la figura 2.10. Pueden tener nodos únicamente en sus aristas o en aristas y vértices.

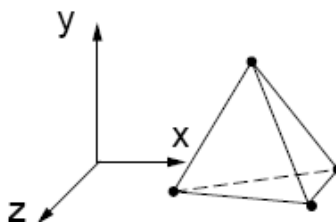


Figura 2.10 Elemento tetraedro nodos en las aristas

- **Hexaedro:** Son elementos tridimensionales con seis caras cuadradas como se observa en la figura 2.11. Pueden tener nodos únicamente en sus aristas o en aristas y vértices.

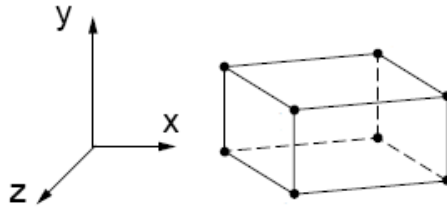


Figura 2.11 Elemento hexaedro nodos en las aristas

Ambos tipos de elementos son capaces de deformarse para lograr discretizar la pieza de interés, el uso de cada uno de ellos dependerá de la complejidad de las geometrías de interés. En la figura 2.12 se muestra un ejemplo de discretización de un modelo utilizando ambos elementos.

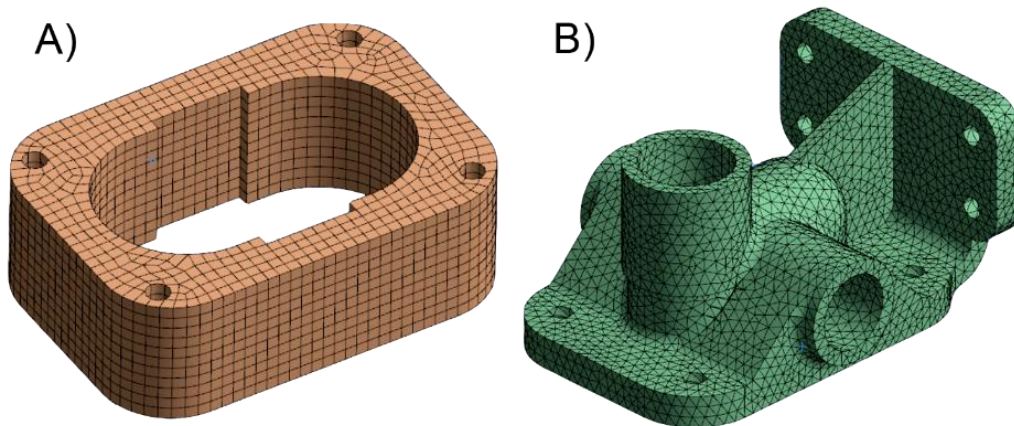


Figura 2.12 Discretización A) elementos hexaédricos B) elementos tetraédricos

- **Voxel:** Los elementos tipo voxel, son cuerpos tridimensionales con cuatro caras cuadradas, pueden contener nodos en sus aristas, vértices y caras. A diferencia de los elementos que se presentaron anteriormente, el voxel no se adapta sobre la superficie de las geometrías a discretizar, si no que mantiene la geometría hexaédrica uniforme generando un escalonamiento como se muestra en la figura 2.13.

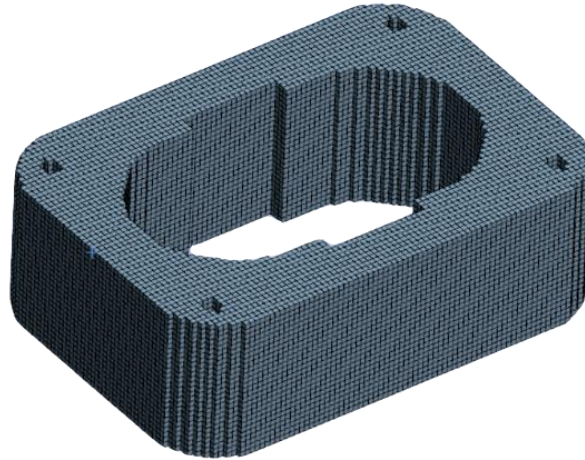


Figura 2.13 Discretización con elementos voxels

Este tipo de elementos son utilizados para la discretización de simulaciones de MA, ya que, al ser elementos con geometrías constantes, estos respetan la altura constante, siendo una especificación deseable para la simulación de cada capa de material impreso.

2.5 Metodología de simulación PBF

La simulación para la MA se ha convertido en una herramienta de gran ayuda para disminuir los errores de construcción, al ser un proceso costoso y cuya repetitividad no es constante [22].

Este proceso de simulación toma las etapas generales del MEF las cuales son: preproceso, proceso y postproceso. En la simulación de MA, cada una de estas etapas abarca varios pasos de preparación que se deben contemplar en el proceso práctico. En la figura 2.14 se muestra un diagrama de flujo a seguir para el análisis de MA [23].

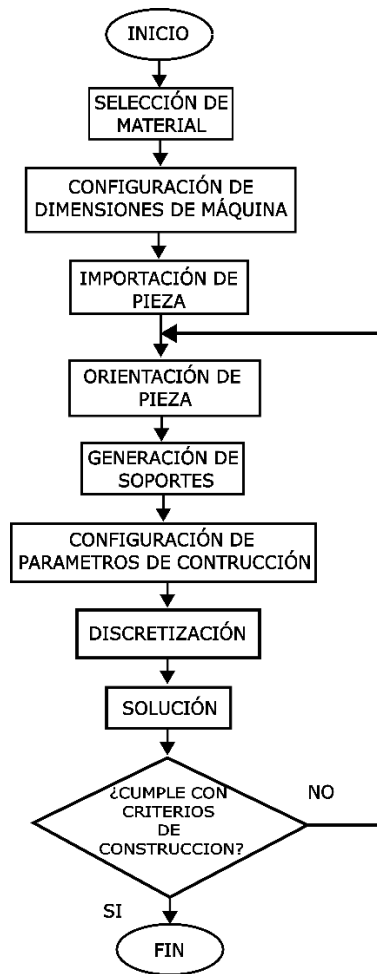


Figura 2.14 Diagrama de flujo para realizar un análisis de elemento finito de MA

A continuación, se describen los puntos que se mencionan en el diagrama de flujo para un análisis de elemento finito de MA.

- **Configuración de características del material:** Como para cada análisis por MEF, el primer paso es la selección o determinación de las características necesarias del material que se vaya a utilizar. Para la MA, es necesario contemplar ciertas características en un rango de temperatura mayor que para un análisis estático común debido a que el material sufre constantes cambios de temperatura y fase. Comúnmente, se requieren las características generales de cualquier material como: módulo de Young, esfuerzo de cedencia, esfuerzo último y densidad. Además, también se requieren las características térmicas que rigen el comportamiento del material durante la fusión como: coeficiente de

expansión térmica, calor específico, temperatura de fusión y conductividad térmica.

- **Preparación de modelo de simulación:** La preparación de modelo es un punto importante tanto en la simulación como en la misma implementación o programación de la máquina de MA, ya que se contempla la generación de los soportes necesarios para la construcción y la orientación de la pieza. La preparación inicia desde la exportación de la pieza del software en el que fue diseñado, generalmente, las piezas son generadas en formato de estereolitografía (.slt), que es el formato estándar para las MA. La orientación y generación de los soportes dependen entre sí, ya que las condiciones de impresión dependen del ángulo entre la cama de construcción y la superficie de adyacente de la pieza. Existen software especializados que pueden generar los soportes en función de la orientación de la pieza, en otros casos, será necesario realizar este paso en un software de CAD, contemplando las dimensiones de la cama y cámara de construcción. En la figura 2.15 se presenta un ejemplo de distintas orientaciones y configuraciones de soportes para una pieza, horizontal y perpendicular a dirección de repintado y vertical con cabeza arriba y abajo, en donde se muestra que se pueden considerar las direcciones de repintado de material y flujo de gas inerte.

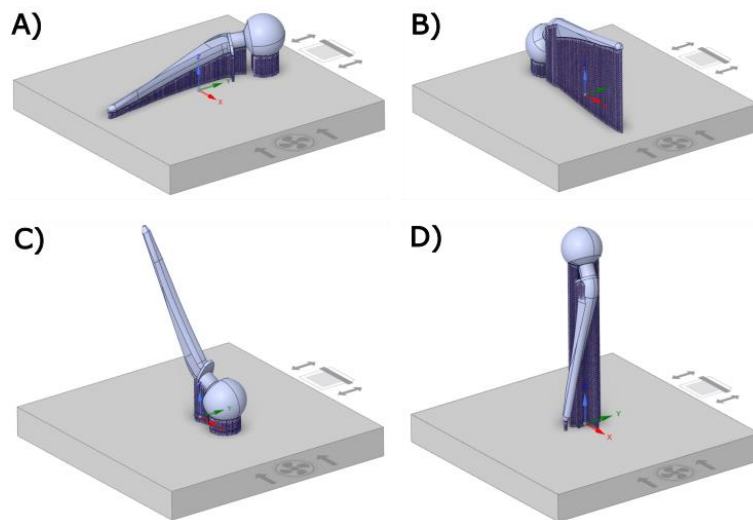


Figura 2.15 Selección de orientación de modelo de prótesis A) horizontal paralelo a dirección de repintado B) horizontal perpendicular a dirección de repintado C) Vertical con cabeza abajo D) vertical con cabeza arriba

Después de seleccionar la orientación de la pieza y la generación de los soportes necesarios, se puede realizar la discretización del modelo para generar los elementos y nodos.

El elemento más común que se usan en el software de simulación de MA, es el voxel, ya que es necesario realizar una discretización vertical para para contemplar la simulación de aplicación de capas de material. En la figura 2.16 se presenta la discretización de la figura 2.15 A.

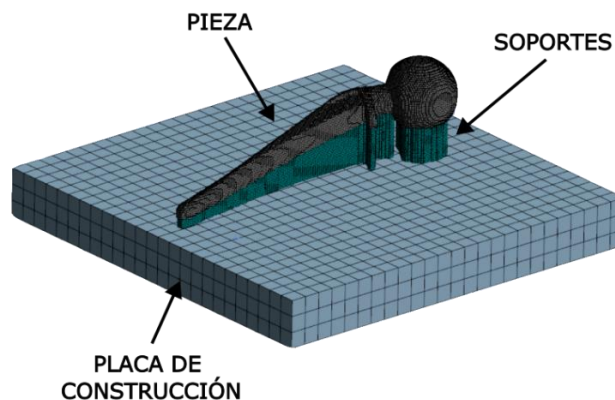


Figura 2.16 Discretización de modelo de simulación PBF

- **Configuración de condiciones de construcción:** La configuración de las condiciones de construcción hace referencia a los parámetros de construcción, las condiciones de la cámara de construcción, las condiciones para el proceso de enfriamiento e incluso podría realizarse la simulación del retiro de los soportes o algún tratamiento térmico. Esto último, abarcaría por completo la construcción de una pieza por MA.

En la tabla 2.1 se muestran los parámetros básicos que requieren configuración en la mayoría del software de simulación de MA; con ello, se realizaría la posterior programación de la máquina.

Tabla 2.1 Parámetros de construcción para condiciones de simulación

Control	Variable	Unidad
Construcción	Potencia	W
	Velocidad de escaneo	mm/s
	Ancho de soldadura	mm
	Ancho de capa	mm
	Estrategia de escaneo	-
	Velocidad de repintado	mm/s
	Temperatura de cámara	°C
	Temperatura de placa de construcción	°C
	Temperatura del polvo	°C
	Flujo de gas	m ³ /min
Post-construcción	Tipo de enfriamiento	-
	Tiempo de enfriamiento	min

- **Solución matemática:** Como usuario, no se tiene control sobre las soluciones matemáticas que realiza el algoritmo solucionador de cada software. Pero estos se basan en las mismas teorías: método de deformaciones inherentes, método de red de circuitos térmicos (TCN) y modelado termo-mecánico cuasiestático (QTM) [24]. El método de deformaciones inherentes es el más simple y realiza ciertas simplificaciones del análisis con el fin de reducir el tiempo y la capacidad computacional. Se asume que el comportamiento térmico por el efecto del escaneo del láser es el mismo en todo el trazado, realizando el cálculo puramente mecánico por cargas térmicas, en lugar de realizar un análisis termo-

mecánico completo [25,26]. Este método utiliza las deformaciones que suceden durante el proceso de fusión y consolidación del material, generándose las tensiones internas en el material, dando así una acumulación de tensiones residuales que causan las deformaciones descritas por

$$e^{tot} = e^e + e^p + e^t + e^{phase} \quad (2.2)$$

donde e^e son las deformaciones elásticas e^p son las deformaciones plásticas, e^t representa las deformaciones de expansión y contracción térmica, y e^t son las deformaciones por cambios de fase.

Posteriormente, el material sufre un relajamiento de tensiones reduciendo e^p por el efecto de la eliminación de los soportes y el corte de la placa de construcción. Por lo que, se define la deformación inherente como

$$e^* = e^{tot} - e^e \quad (2.3)$$

la cual contempla suma de las deformaciones plásticas e^p , la deformación de expansión y contracción térmica e^t y por cambios de fase e^{phase} [25].

Las deformaciones inherentes de un proceso de MA pueden determinarse mediante calibración de la máquina y el software utilizado. Esta calibración se realiza utilizando distintos modelos generados por computadora como el que se muestra en la figura 2.17. Esta probeta en voladizo es impresa en distintas direcciones de la placa de construcción para después realizar el corte con la placa de construcción generando así la deformación de la pieza (e_{xx} , e_{yy} , e_{zz}). Estas deformaciones son los datos de entrada para el software con las que se determinarán las deformaciones de la pieza simulada [27].

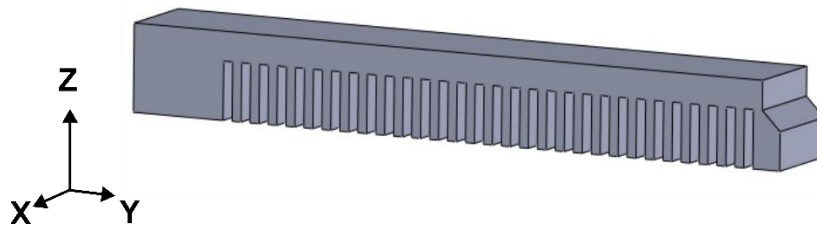


Figura 2.17 Probeta en voladizo para calibración

Obteniendo la deformación inherente al sistema, es posible realizar los cálculos de deformación de cada capa de material impreso que se acumulando durante todo el proceso mediante la siguiente ecuación:

$$[K] \{U\} = \{f^*\} \quad (2.4)$$

donde K representa la matriz de rigidez estática, U la matriz de desplazamientos nodales y f^* es la fuerza nodal por deformación inherente en el cálculo por FEM. Además, la matriz $\{f^*\}$ se puede representar por:

$$\{f^*\} = \int [B][D^e]\{e^*\} \quad (2.5)$$

donde B es la matriz de desplazamientos nodales, D^e es la matriz de estrés-deformación y $\{e^*\}$ es la matriz de deformación inherente.

Al obtener las deformaciones es posible calcular los esfuerzos residuales mediante

$$\{\sigma\} = [D^e]([B]\{U\} - \{e^*\}) \quad (2.6)$$

Los dos métodos restantes (TCM, QTM) realizan un cálculo mayor para llegar a los resultados requeridos para lo cual es necesario un hardware capaz de realizar un trabajo intensivo [24].

Estos métodos no realizan la simplificación a un modelo mecánico, sino que consideran que cada elemento representa un volumen térmico de la pieza y se modela mediante conductancias y resistencias. La temperatura de cada elemento se calcula en función de elementos adyacentes [28,29].

Estos métodos consideran tres niveles de discretización del modelo térmico: nivel de unidad de control (TCE), de súper capa y nivel de pieza completa. El nivel TCE se refiere a unidad de elemento voxel con el que se realiza la discretización de la pieza, la súper capa considera un conjunto de voxel que estos a su vez formarán el último nivel, el de la pieza completa en la cual cada voxel y super capas adyacentes realizan la transferencia de calor desde la capa

superior la cual es la más caliente, hasta la placa de construcción, que es la menos caliente [28].

Este método de modelación térmica contempla sus condiciones de conservación de la energía, que, a su vez, se relacionan con los niveles adyacentes utilizando condiciones de transferencia de calor por conducción. Utilizando estos métodos es posible obtener el historial térmico del modelo de simulación.

- **Interpretación de los resultados:** Las simulaciones por MEF pueden arrojar un conjunto de resultados con los que el usuario tomará la decisión de modificar o realizar el proceso práctico de construcción. Generalmente, los resultados más utilizados en simulaciones de PBF a nivel de macro-escala, son las deformaciones resultantes de la pieza antes, durante y después de la construcción, así como en la etapa de soporte.

Si las deformaciones son excesivas, se puede tomar la decisión de modificar la orientación de la pieza o considerar un mayor número de soportes para aumentar la estabilidad de la pieza. De igual manera, se puede realizar una modificación en los parámetros de construcción para que el proceso de fusión del material sea el adecuado.

Al agregar una mayor cantidad de soportes a la pieza, se pueden disminuir los esfuerzos residuales en la pieza, ya que el comportamiento térmico se verá afectado por la conducción de calor de los soportes de la pieza impresa [30].

2.6 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es una metodología utilizada en la investigación científica y en la industria para planificar, implementar y analizar experimentos de manera sistemática y eficiente. Consiste en la selección y manipulación cuidadosa de variables independientes (factores) con el objetivo de comprender y optimizar el efecto de estos factores en una o varias variables de interés (variables de respuesta) [31].

El diseño de experimentos permite obtener información precisa y confiable sobre cómo los factores afectan las respuestas y cómo interactúan entre sí. Al planificar y ejecutar

los experimentos de manera adecuada, se puede reducir la variabilidad, identificar los factores más influyentes, determinar los valores óptimos de los factores y obtener conclusiones estadísticamente sólidas.

El diseño de experimentos se basa en principios estadísticos y utiliza diferentes técnicas y diseños experimentales como el diseño factorial, el diseño de bloques, el diseño de superficie de respuesta, entre otros. Estas técnicas permiten controlar y manipular de manera sistemática las condiciones experimentales para obtener conclusiones válidas y útiles.

El diseño de experimentos se aplica en diversos campos incluyendo la investigación científica, la ingeniería, la manufactura, la agricultura, la medicina, entre otros, con el objetivo de mejorar la calidad, eficiencia y comprensión de los procesos y sistemas.

Los diseños experimentales pueden basarse en distintas metodologías, cada una de ellas dependerá de las condiciones del proceso que se quiera optimizar. Una de las metodologías más utilizadas es el modelo factorial, donde el total de experimentos es el número de niveles elevado al número de factores. Siguiendo esta metodología se vuelve poco viable realizar experimentos cuando se tengan más de 3 factores.

Para resolver este problema, en la década de 1950, el ingeniero y estadístico japonés Genichi Taguchi introdujo el concepto de robustez para la generación de diseños experimentales [32]. Taguchi aportó la filosofía del diseño desde el punto de vista de la calidad del producto, al hacerlos resistentes a variaciones del entorno. Para ello, presentó dos objetivos principales [33]:

- Asegurar que la variable de respuesta alcance el valor objetivo.
- Que la variación de la respuesta sea la mínima a los cambios del entorno.

El diseño de experimentos siguiendo la metodología de Taguchi presenta una solución al problema de la cantidad de experimentos cuando existen más de tres variables a controlar, usando el concepto de matriz ortogonal [34]

Las matrices ortogonales son un conjunto de estructuras matemáticas que se utilizan como arreglos para los distintos parámetros de interés. La ventaja de utilizar estas matrices es que permite evaluar de forma efectiva con una mínima cantidad de experimentos. Si se selecciona la matriz de manera adecuada, se garantiza que los distintos niveles de los factores se combinan de manera equilibrada y se controlan los

posibles efectos de confusión, lo que facilita el análisis de los resultados y la identificación de los factores más influyentes [31].

Los pasos propuestos por Taguchi para aplicar su metodología propuesta son los siguientes:

- Definir el objetivo del proceso.
- Determinar los factores y niveles para estudiar el comportamiento de la variable objetivo.
- Definir la matriz ortogonal necesaria para la cantidad de factores y niveles.
- Llevar a cabo la experimentación de la matriz completa.
- Análisis completo de los datos para determinar el efecto de los factores.

El arreglo L18 es una de las matrices propuestas por Taguchi, en donde es posible evaluar hasta ocho distintos parámetros con la peculiaridad de definir uno de ellos con solo dos niveles a diferencia de los parámetros restantes, que se deben definir con tres niveles. En la figura 2.18 se presenta esta matriz, las columnas están definidas para colocar cada uno de los parámetros. Esta matriz minimiza hasta 18 experimentos necesarios para ocho parámetros; si se siguiera una metodología de experimentación factorial, el número total de experimentos sería de 4374.

Núm. de corrida	Arreglo $L_{18} (2 \times 3^{7-5})$							
	Núm. de columna							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	2	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

1 factor con dos niveles se asignan a la columna 1.
Los factores con tres niveles se asignan a las columnas restantes: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Figura 2.18 Definición de matriz ortogonal L18 bajo metodología de Taguchi [31]

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el capítulo I se plantearon los objetivos del proyecto, entre los cuales se encuentra el estudio y la obtención de la relación que existe entre los parámetros de construcción de MA con el fin de obtener la combinación donde los errores de construcción sean los mínimos. Para lo cual se plantea una metodología de análisis de experimentos enfocado a simulaciones por elemento finito y si determinar un primer rango de operaciones donde los parámetros de construcción de MA sin la necesidad de realizar experimentaciones físicas.

Para realizar este estudio, se requiere observar los resultados que arrojan las distintas combinaciones de los valores que pueden tomar los parámetros de construcción seleccionados. En la figura 3.1 se presenta la metodología planteada para lograr los objetivos. En este capítulo se describirán cada uno de los puntos.

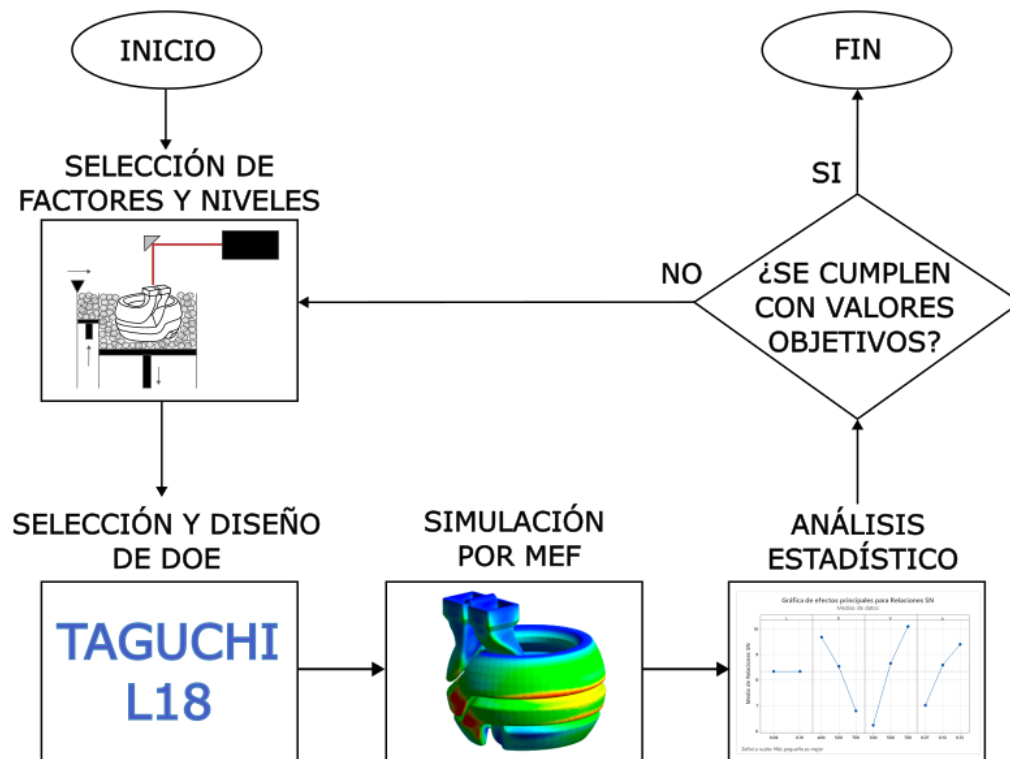


Figura 3.1 Metodología general de proyecto

3.1 Selección de factores y niveles de construcción Powder Bed Fusion

La selección de los parámetros de construcción se basó en la densidad de energía suministrada al polvo para poder realizar la fusión de este. Este valor relaciona los parámetros de la potencia del láser, velocidad de escaneo del láser, espacio entre pistas de soldadura y la altura de capa. Estos son los factores principales que afectan la pieza impresa en términos de distorsión y esfuerzos residuales.

Cada uno de estos parámetros puede tomar una gran cantidad de valores que están condicionados, principalmente, por las características de la máquina que se utilizará, así como las características del material.

Debido al tipo de máquina a utilizar, estos factores quedan condicionados a los valores que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Acotamiento de valores en función de las características de máquina

Parámetro	Unidad	Rango de valores
Potencia	W	50 - 1000
Velocidad	mm/s	100 - 7000
Espacio entre soldadura	mm	min de 0.01
Ancho de capa	mm	0.01 - 0.1

La selección de los valores en función del material se basó en investigaciones previas en [35-38], en las cuales se realizaron estudios físicos de los parámetros de construcción en probetas para pruebas de tracción.

Sun et al. en [35], investigaron cuatro principales factores de construcción: la potencia, la velocidad de escaneo, el espacio entre soldaduras y el ancho de capa. Aplicando un diseño experimental ortogonal, encontraron que la mejor combinación para estos factores fue de $P = 460 \text{ W}$, $V = 700 \text{ mm/s}$, $h = 0.06 \text{ mm}$ y $t = 0.03 \text{ mm}$. Estos factores se utilizaron para la construcción de probetas para pruebas de tensión obteniendo una resistencia a la tracción de 153.5 MPa, una dureza de 119 HV y una densidad relativa de las piezas de 91.62%, donde la potencia es el principal parámetro de construcción que impacta, seguido de la velocidad de escaneo.

Li et al. en [36], realizaron un diseño experimental similar para investigar la relación de los factores de impresión obteniendo como la mejor combinación de $P = 240 \text{ W}$, $V = 750 \text{ mm/s}$, $h = 0.07 \text{ mm}$ y $t = 0.03 \text{ mm}$, las pruebas se realizaron imprimiendo piezas

cúbicas de $10 \times 10 \times 10$ mm y reportaron una resistencia a la tracción de 347 MPa, una dureza de 133.9 HV y una densidad relativa de 98.79%. Ambas investigaciones, reportan que la dureza y la resistencia a la tensión aumentan al aumentar la potencia del láser y disminuir la velocidad, obteniendo una resistencia a la tensión mínima de 250 MPa y una máxima de 350 MPa, una microdureza mínima de 117 HV y máxima de 135 HV, con 160 W y 280 W, respectivamente para la potencia del láser.

Jahns et al. en [37], investigaron la relación que tiene la potencia, la velocidad en la densidad relativa y la conductividad eléctrica en piezas impresas, reportando como mejor resultado a las piezas impresas con $V = 400$ mm/s y una potencia de 300 W, obteniendo una densidad de 99.7% y una conductividad eléctrica de 13 MS/m, concluyendo que el aumento de la potencia afecta la rugosidad de las piezas, pasando de 8 μ m hasta 18 μ m, con un aumento de la potencia de 100 a 400 W; sin embargo, la conductividad eléctrica aumentó de 6 a 14 MS/m.

Katrin et al. en [38], realizaron estudios estadísticos con el fin de obtener piezas con la mayor densidad basados en los parámetros de construcción de MA. De igual manera, determinaron que el parámetro con mayor influencia es la potencia del láser, específicamente, cuando la potencia supera los 300 W; con ello, se logra fundir por completo el material. Estas pruebas se realizaron en probetas cúbicas de 10 cm por lado.

Estas son las principales referencias para definir los niveles a utilizar en el DOE, los cuales se presentan en la tabla 3.2. Se tomaron tres niveles para cada factor los cuales cubren los valores máximos y mínimos en las referencias anteriores, excepto para el ancho de capa. Para este parámetro se tomó como valor mínimo el tamaño de la partícula que se utilizará y como máximo, la resolución de la máquina.

Tabla 3.2 Factores y niveles seleccionados para para DOE

Parámetros	Unidad	Niveles
Potencia (P)	W	400, 500, 700
Velocidad (V)	mm/s	300, 500, 700
Espacio entre soldaduras (h)	mm	0.07, 0.1, 0.13
Ancho de capa (t)	mm	0.08, 0.1

3.2 Selección y diseño de DOE

Para realizar un estudio donde se ven implicadas distintas variables con distintos valores que pueden tomar cada uno de ellos, no es factible la realización experimental de cada una de las combinaciones posibles, es decir, un diseño factorial. Para lo cual existen otras estrategias estadísticas con las que es posible realizar estudios a una gran cantidad de variables y valores.

El método de diseño experimental de Taguchi se basa en la realización de matrices ortogonales con la cantidad de experimentos suficientes para poder estimar el impacto de las variables controlables hacia la variable de respuesta. Para el caso de estudio que se presenta en este documento, se tiene un total de 54 combinaciones posibles con la cantidad de factores y niveles seleccionados, siendo éste un número muy elevado de experimento que se quiere realizar.

Se eligió el diseño experimental en arreglo L18, debido a que permite usar tres niveles para tres parámetros, y dos niveles para el restante. Esto corresponde con los parámetros seleccionados de la tabla 2.2.

Como señal de respuesta, se estudiarán las deformaciones después de la construcción y antes del retiro de los soportes, buscando que esta no supere los 0.25 mm lo cual es la tolerancia permitida para su posterior ensamble en la máquina de temple. Además, se estudiarán los esfuerzos residuales con el fin de que el proceso no supere los 470 MPa para evitar las fisuras la pieza.

En la tabla 3.3 se muestra el arreglo L18 con las combinaciones totales del diseño experimental, omitiendo señales de ruido y considerando que la cámara de impresión mantiene las variables restantes siempre controladas. Estas combinaciones se cargarán en el software de simulación por MEF.

Tabla 3.3 Matriz experimental L18 para parámetros de construcción de MA

ARREGLO L18				
Número de experimento	$t(\text{mm})$	$P(\text{W})$	$V(\text{mm/s})$	$h(\text{mm})$
1	0.08	400	300	0.07
2	0.08	400	500	0.1
3	0.08	400	700	0.13
4	0.08	500	300	0.07
5	0.08	500	500	0.1
6	0.08	500	700	0.13
7	0.08	700	300	0.1
8	0.08	700	500	0.13
9	0.08	700	700	0.07
10	0.1	400	300	0.1
11	0.1	400	500	0.07
12	0.1	400	700	0.1
13	0.1	500	300	0.1
14	0.1	500	500	0.13
15	0.1	500	700	0.07
16	0.1	700	300	0.13
17	0.1	700	500	0.07
18	0.1	700	700	0.1

3.3 Simulación con MEF

Esta simulación de parámetros se realizará a la bobina de inducción que se muestra en figura 3.2 creada en una sola pieza con un conducto interno sin utilizar soportes internos.

Por condiciones de diseño, la bobina fue modelada con las superficies necesarias para la MA. Se consideró la orientación de construcción, las superficies máximas que se pueden tomar para la impresión, sin la necesidad de añadir soportes, así como la disminución de ángulos rectos para minimizar las zonas de concentración de esfuerzos. Esto limita la opción de configuración de la orientación de la pieza a una única posibilidad, la cual corresponde a la figura 3.2.

La bobina requiere ser fabricada en la aleación de Cobre, Cromo y Circonio (CuCr1Zr). Algunas de las características de esta aleación, son buena conductividad eléctrica y

térmica. El material que se pretende utilizar es polvo metálico generado por la atomización de gas con una distribución geométrica esférica de diámetro de 80 μm .

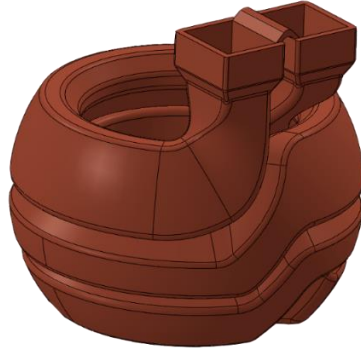


Figura 3.2 Bobina de induccion electromagnética

Las simulaciones se realizarán en el entorno de simulación ANSYS Additive®, por lo que, se requiere preparar el modelo CAD con las geometrías externas, definidas por: la placa de construcción y los soportes necesarios. Como se menciona en la sección 2.5, los pasos a seguir para la simulación son: configuración de material, configuración de área de impresión y pieza, discretización, configuración de parámetros de construcción, solución e interpretación de los resultados.

3.3.1 Configuración de material

La aleación *CuCrZr* es altamente utilizada en aplicaciones como herramientas de conformado en caliente, electrodos de soldadura, componentes de reactores nucleares, entre otras en donde se requiera una combinación de alta resistencia a la tracción, buena conductividad eléctrica y térmica [37–40]. Por esta razón, se seleccionó como material de construcción de la bobina de inducción.

Estas características son necesarias para realizar los cálculos del proceso de construcción de MA. Específicamente, ANSYS Additive® requiere las siguientes características: temperatura de fusión de 1080 °C, resistencia a la cedencia de 470 MPa, módulo de Young de 128 GPa, así como las siguientes características cuyo comportamiento depende de la temperatura:

- Conductividad térmica: Como se observa en la figura 3.3, la capacidad de conducción térmica de la aleación $CuCrZr$ está entre los 325 y 350 W/mK, teniendo un comportamiento relativamente constante con respecto al aumento de la temperatura, siendo una característica importante para la aplicación a la que se someterá la pieza.

Para la MA, la conducción térmica elevada significa un comportamiento más uniforme de la temperatura, ya que fluiría rápidamente desde las zonas de aplicación del láser hacia la placa de construcción.

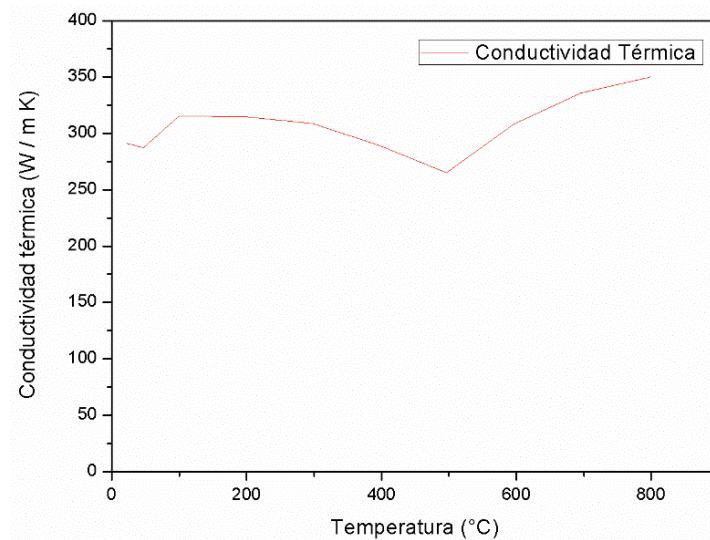


Figura 3.3 Conductividad térmica de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [39]

- Calor específico: Para conocer cuánto aumenta la temperatura del material con respecto a la aplicación de energía por medio del láser, el software de simulación requiere conocer el calor específico del material, y este dato es necesario en función de la temperatura, ya que la pieza estará en constante cambio durante el proceso de construcción. La figura 3.4 presenta el comportamiento del calor específico de la aleación $CuCr1Zr$, como se puede observar, se requiere mayor energía para aumentar la temperatura cuando ésta es mayor.

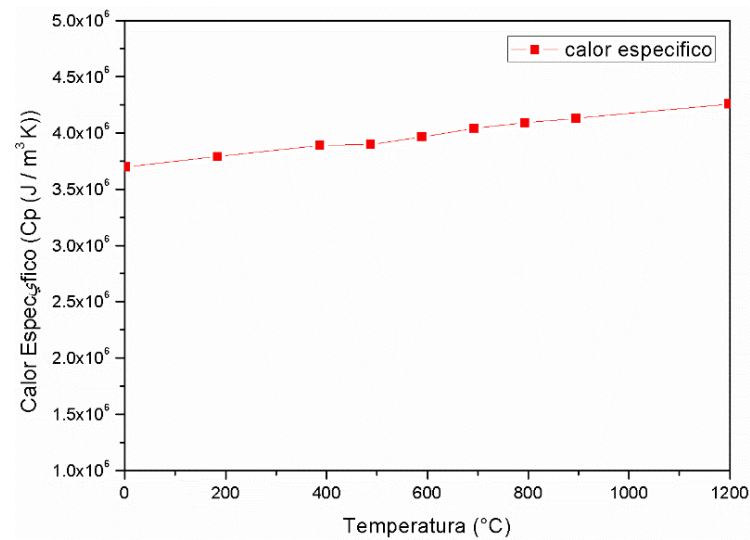


Figura 3.4 Calor específico de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [40]

- Coeficiente de expansión térmica: La expansión térmica es una característica muy importante para evaluar la deformación durante el proceso de MA, debido a que, durante la etapa de fusión y consolidación del material, este se expande y se contrae. Esta característica es necesaria para realizar la simulación, y su comportamiento varía en función de la temperatura a la que se encuentra el material como se muestra en la figura 3.5.

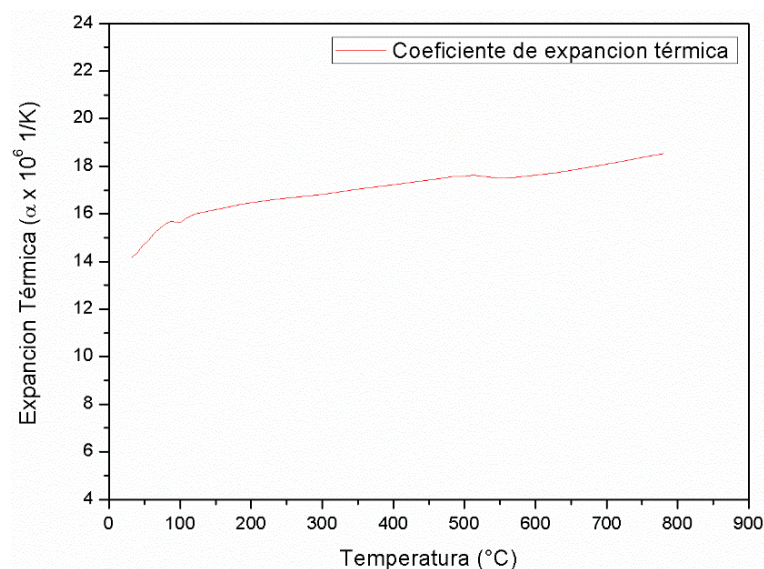


Figura 3.5 Coeficiente de expansión térmica de la aleación CuCr1Zr en función de la temperatura [39]

Una característica importante en la determinación del material en simulaciones que estudian un cambio de fase en un material como podrían ser en simulaciones de soldadura, conformado, fundición o MA, es el comportamiento plástico efectivo en distintos rangos de temperatura. Esto representa cómo las características plásticas del material cambian en función de la temperatura en la que se esté trabajando. Para el caso de la aleación $CuCr1Zr$ se utilizaron los 8 datos presentados en la figura 3.6.

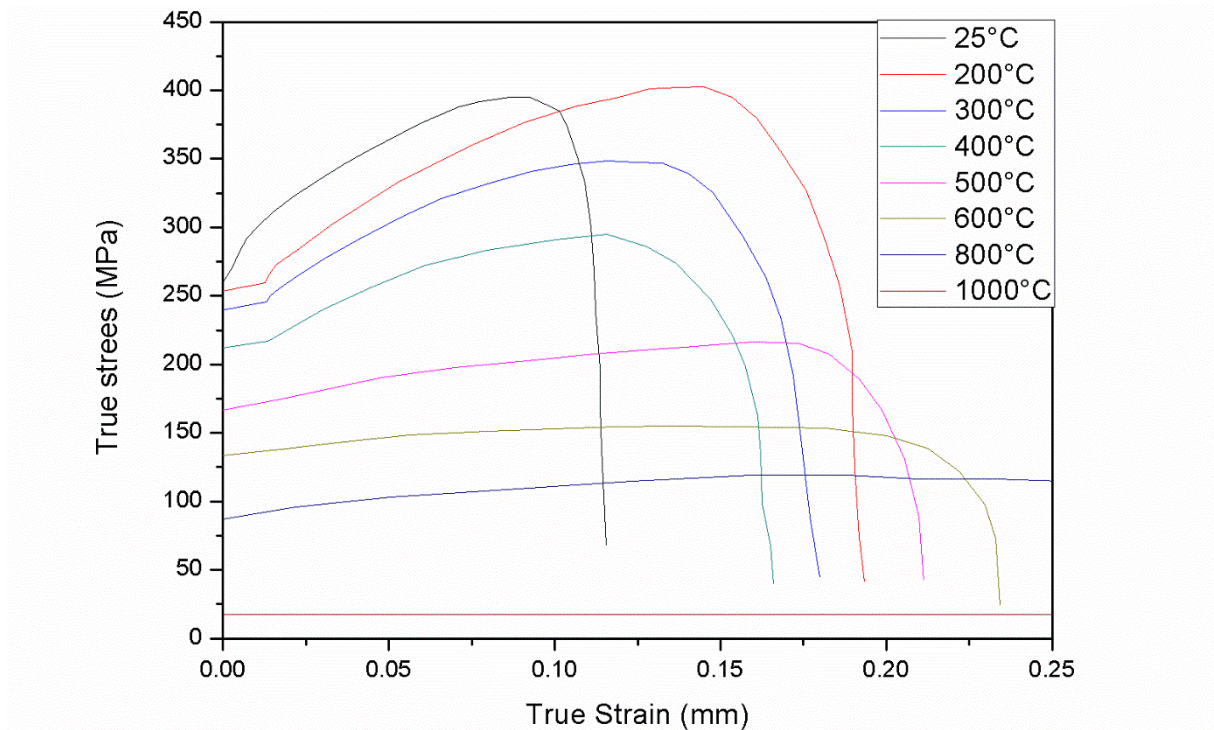


Figura 3.6 Comportamiento plástico térmica de la aleación $CuCr1Zr$ en función de la temperatura [41,42]

3.3.2 Preparación de modelo

Como se mencionó anteriormente, la preparación del modelo incluyen la orientación y la generación de los soportes necesarios para la contracción. Estas geometrías se añaden utilizando el módulo de preparación para MA de ANSYS, en donde es posible realizar la programación de una máquina genérica con la que se podrá obtener la posición de la pieza en la placa de construcción y la cantidad de soportes necesarios para realizar la impresión.

La posición es centrada en el área de impresión, con una altura de 8 mm para poder realizar el corte posterior a la construcción. La generación de soportes respeta las reglas de diseño: ángulo crítico para superficies de 45° y máxima distancia en voladizo de 2.5 mm. En la figura 3.7 se observa el modelo generado para las simulaciones.

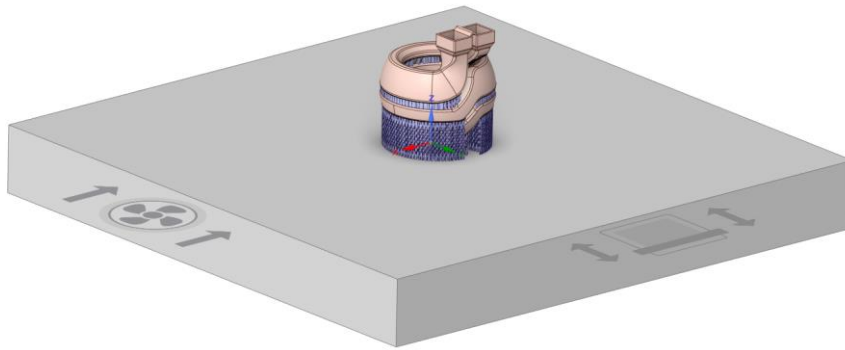


Figura 3.7 Modelo de simulación para análisis de elemento finito

Estos valores corresponden a las reglas de diseño y de construcción para la MA, con las cuales fue creada la geometría de interés, y por lo que, es posible crear una espira que corresponde a la bobina de inducción electromagnética con un conducto interno para la refrigeración de ésta.

3.3.3 Discretización

El mallado o discretización del modelo se realiza directamente en la interfaz de ANSYS Additive®. Como se puede observar en la figura 3.8, el mallado de la pieza es únicamente en la bobina y soportes. El análisis de sensibilidad de malla convergió en un tamaño de elemento de 0.3 mm con el que se tiene un total de 682,741 elementos y 3,336,807 nodos.

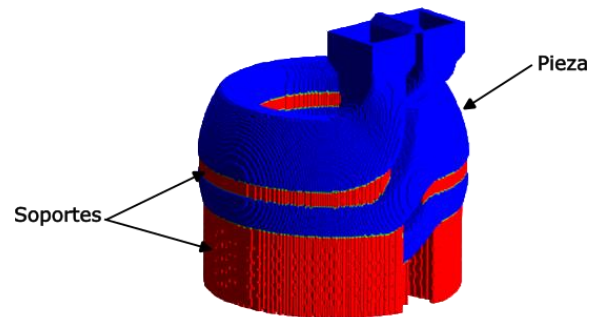


Figura 3.8 Mallado de la pieza con elementos tipo Voxel

3.3.4 Configuración de parámetros de construcción

La configuración de los parámetros es el punto central del presente trabajo. Este paso se realizará de forma repetitiva configurando cada uno de los parámetros de la matriz experimental que se presentó en la tabla 3.3. Los parámetros restantes se mantendrán fijos en cada una de las simulaciones, en la tabla 3.4 se muestran dichos parámetros.

Tabla 3.4 Parámetros de construcción para simulaciones PBF

Parámetro	Valor
Temperatura de la cámara	50 °C
Temperatura de placa de construcción	200 °C
Potencia del laser	Matriz
Diámetro del laser	0.1 mm
Velocidad de escaneo	Matriz
Espacio entre pistas de soldadura	Matriz
Ancho de capa	Matriz
Velocidad de repintado	9 mm/s
Temperatura del polvo	50 °C

3.4 Análisis estadístico

Una vez completada la ejecución de las 18 simulaciones, se procede al análisis de los datos recopilados (distorsión y esfuerzos residuales). El objetivo principal del análisis es identificar las variables de construcción de mayor influencia en la MA y determinar su efecto.

Para ello, se utilizan las técnicas estadísticas adecuadas con la ayuda del software Minitab® realizando un análisis de varianza (ANOVA) y los gráficos de control, para evaluar la relación entre las variables de construcción y las respuestas de interés. Se calcularon los valores promedio, desviaciones estándar y se generaron gráficos relevantes para visualizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las figuras 4.1a y 4.1b se muestran la distorsión y esfuerzos residuales obtenidos en cada simulación descritos en la tabla 3.3 respectivamente. Se puede observar que los resultados de las simulaciones 3, 6 y 12 son las que presentaron menores distorsiones y esfuerzos residuales.

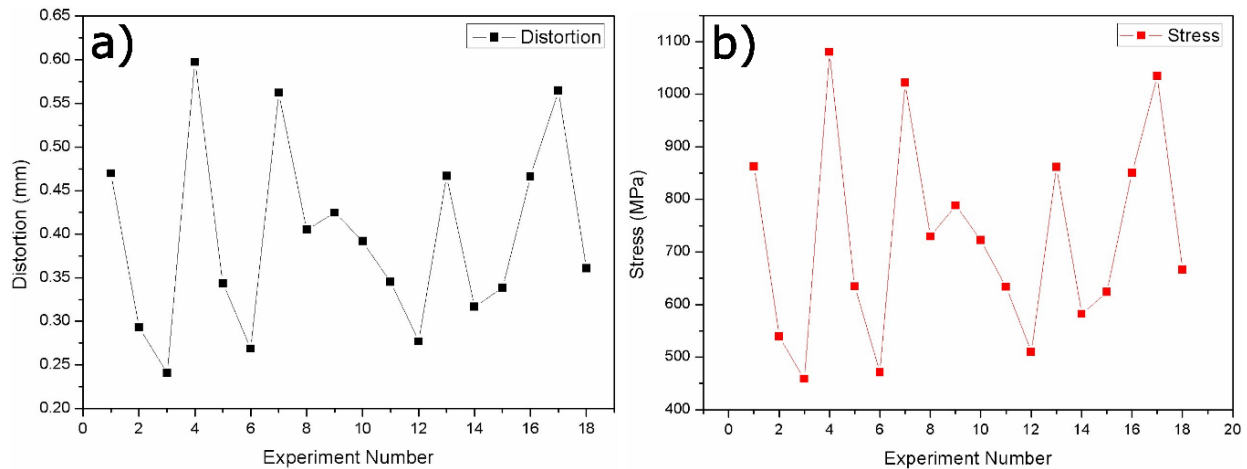


Figura 4.1 Resultados finales. a) distorsión total, b) esfuerzo residual

Por otro lado, las simulaciones 4, 7 y 17 son las que presentaron mayor distorsión y esfuerzos residuales superando los 0.25 mm y 470 MPa esperados en los resultados. Estas simulaciones representan una total distorsión de la forma y posibles fracturas del material ya que los esfuerzos residuales se encuentran a más del 112% del valor limite. Las simulaciones en donde se implementó menor cantidad de energía se tuvo una menor deformación. Sin embargo, en la simulación 4, aunque el suministro de energía fue mínimo (400 W) debido a que la velocidad de escaneo fue baja (300 mm/s), la distorsión y los esfuerzos residuales fueron los más altos de todas las simulaciones. Entonces, se tiene que, mientras más energía se suministra al polvo metálico y la velocidad de escaneo es baja, el gradiente de temperatura es mayor, por lo tanto, los esfuerzos en la pieza aumentan como se observa en la figura 4.1..

4.1 Parámetros de proceso (Powder Bed Fusion) relevantes para la distorsión geométrica del inductor

En todas las simulaciones, las deformaciones máximas se presentaron en la zona del cambio de sección entre la espira inferior y la espira intermedia; en estas zonas, las superficies exteriores de la pieza tienen ángulos más pronunciados.

Otras zonas críticas, son las superficies en contacto con los soportes. En las figuras 4.2a y 4.2b se muestran las distorsiones para la simulación que presentó menor y mayor deformación, es decir, simulación 3 y 4, respectivamente.

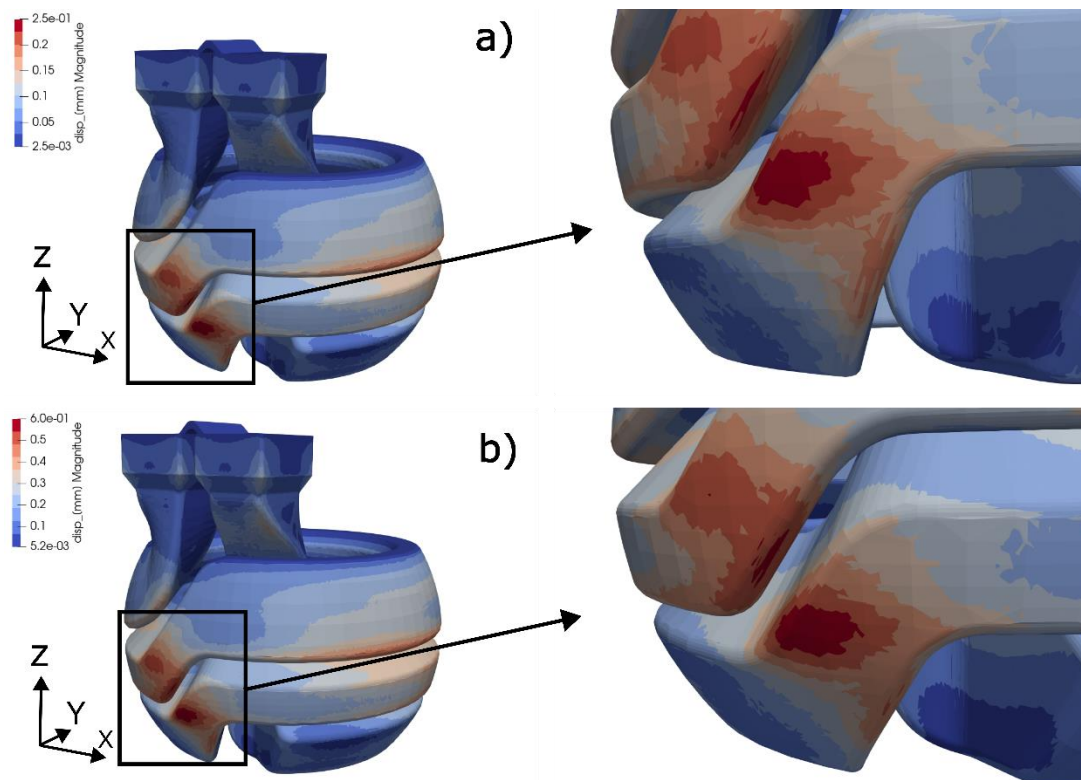


Figura 4.2 Resultados de simulación de distorsión. a) simulación #3 y b) simulación #4

Para la simulación 3, se utilizaron los siguientes parámetros de construcción: $P = 300$ W, $V = 700$ mm/s, $h = 0.13$ mm, y $t = 0.8$ mm, con ello, la cantidad de energía suministrada fue de 54.94 J/mm^3 . En la simulación con mayor deformación (simulación 4), los parámetros utilizados fueron: $P = 500$ W, $V = 300$ mm/s, $h = 0.07$ mm, y $t = 0.8$ mm, la energía resultante en esta simulación fue de 297.6 J/mm^3 . Para esta última

simulación, se presentó una condición en donde la potencia fue excesiva con relación al tiempo en que permanece aplicada al polvo, es decir, la velocidad de escaneo no fue suficiente. Además, al utilizar una h menor al tamaño del diámetro del láser, se generó un sobre empalme entre las pistas de soldadura (ver figura 4.3), generando una gran cantidad de energía en las áreas escaneadas.

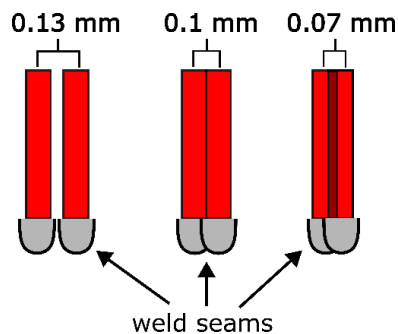


Figura 4.3 Visualización de distintos valores de distancia entre cordones de soldadura

La figura 4.3 muestra que los factores V , P y h en conjunto con los niveles seleccionados, presentan una relación en el comportamiento de la deformación de la pieza. La velocidad de escaneo es más relevante que los parámetros restantes, por el tiempo necesario para fundir el material. La potencia tiene menor efecto, ya que hasta cierto nivel, el polvo ya está en estado líquido y aumentarla no impacta significativamente a la deformación, excepto si la potencia es lo suficientemente excesiva como para evaporar el material como se menciona en [7,8].

Debido a que la línea que representa al ancho de capa (t) es horizontal (ver figura 4.4), este factor no es relevante para la deformación y esfuerzos residuales durante el proceso de impresión. Por lo que, es posible eliminarlo de la matriz ortogonal que se muestra en la tabla 3.3 y establecer un valor constante de 0.1 mm, para disminuir el tiempo de impresión.

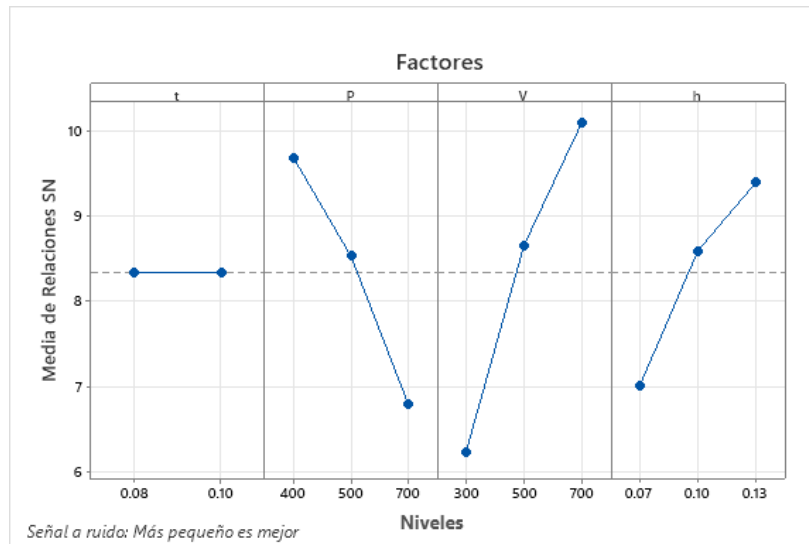


Figura 4.2 Relación señal-ruido para respuesta de deformación

Los resultados del análisis estadístico (ver tabla 4.1) demuestran que la velocidad es el parámetro que más afecta a la deformación seguido por la potencia. Lo que concuerda con los resultados experimentales presentados en [36,39,43,44]. Estos dos parámetros resultaron ser los más relevantes al tratarse de un método de construcción basado en la fusión de material en polvo. Durante el proceso de construcción de la pieza, se busca generar pistas de soldadura uniforme como se muestran en la figura 4.3, los principales parámetros que afectan el estado de la soldadura es la velocidad de escaneo y la potencia, como se muestra en la tabla 4.1. Por ejemplo, cuando la potencia se maximiza y la velocidad es mínima, se generará un cordón de soldadura no uniforme; mientras que, cuando la velocidad es alta, el cordón de soldadura será intermitente, es decir, existirán zonas con polvo metálico no fundido [8].

Tabla 4.1 Respuesta para relación señal a ruido de resultados de deformación

Nivel	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>h</i>
1	8.338	9.686	6.238	7.015
2	8.332	8.531	8.661	8.595
3		6.788	10.105	9.395
Delta	0.006	2.897	3.867	2.38
Clasificación	4	2	1	3

4.2 Parámetros de proceso (Powder Bed Fusion) relevantes para los esfuerzos residuales en el inductor

Los parámetros para obtener el menor esfuerzo son los mismos con los que se obtuvo de formación mínima en la pieza. Como se observa en la figura 4.5, no se presentan zonas específicas en donde se encuentran los mayores esfuerzos, ya que estos son inherentes al proceso, es decir, nunca serán cero y se presentan en toda la pieza. En la figura 4.5a, se muestran los resultados de la simulación 3, en donde se puede observar que el esfuerzo máximo fue de 459 MPa; este resultado está cercano a la resistencia a la cedencia del material de 470 MPa. Por lo que, para disminuir los esfuerzos residuales generados en el proceso de impresión, es necesario realizar un tratamiento térmico en la pieza, y posteriormente, cortar la placa de construcción y retirar los soportes.

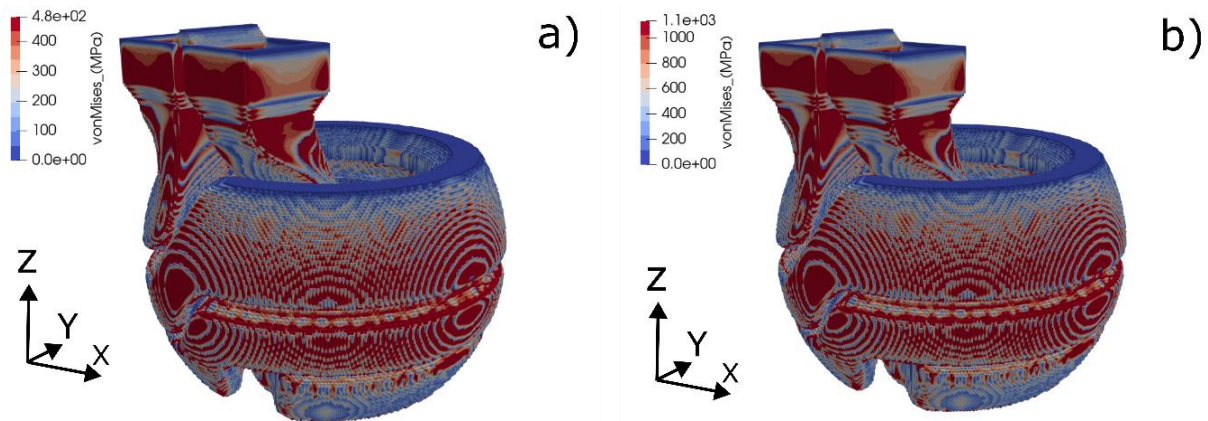


Figura 4.3 Resultados finales de esfuerzos residuales. a) simulación número 3, b) simulación número

4

El análisis estadístico de los parámetros para el esfuerzo mostró la misma correlación que en el análisis de deformación. Como se muestra en la figura 4.6, la velocidad de escaneo y la potencia, son los parámetros con mayor relevancia. A diferencia de los resultados del análisis estadístico para la deformación, la línea que representa el valor para el espesor de capa (h) tiene una ligera inclinación; sin embargo, este factor se puede eliminar de la matriz ortogonal y tratarlo como un parámetro constante. Es

posible disminuir los esfuerzos residuales que aparecen durante el proceso de impresión con el incremento de la temperatura de la cámara de construcción, la placa de construcción y el material en polvo, de acuerdo con lo mencionado en [45,46]. Esto podría ayudar a mejorar el comportamiento de la construcción del inductor ya que los mejores resultados obtenidos se encuentran muy cerca de los límites establecidos.

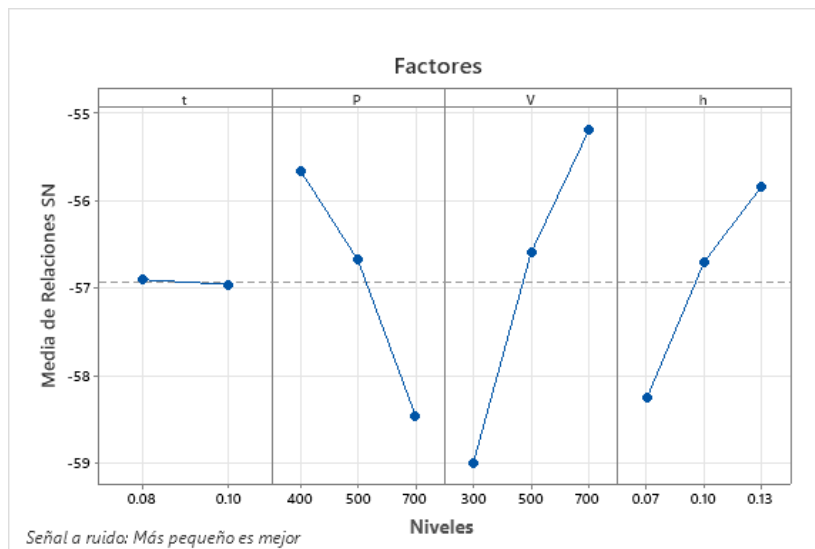


Figura 4.4 Relación Señal-ruido para respuesta de esfuerzos residuales

Los resultados estadísticos para los esfuerzos residuales se muestran en la tabla 4.2. La clasificación demuestra que los parámetros más relevantes para los esfuerzos residuales es la velocidad y la potencia. Debido a que la velocidad controla el tiempo de exposición del láser sobre el polvo metálico, esta fue el parámetro más dominante.

Tabla 4.2 Respuesta para relación señal a ruido de resultados de esfuerzos

Nivel	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>h</i>
1	-56.91	-55.66	-59.01	-58.26
2	-56.96	-56.68	-56.6	-56.7
3		-58.46	-55.19	-55.84
Delta	0.05	2.8	3.82	2.42
Clasificación	4	2	1	3

En este capítulo, hemos presentado los resultados obtenidos a través de las simulaciones, los cuales uno de ellos se alinea con las expectativas y objetivos planteados en esta investigación. Estos resultados muestran una similitud con otras investigaciones. Sin embargo, también es crucial destacar que, en la mayoría de las simulaciones, hemos observado resultados con un rango de error significativo. La identificación de estos resultados inesperados subraya la complejidad inherente al proceso de MA y señala áreas que requieren un análisis más detenido en futuras investigaciones. En el próximo capítulo de conclusiones, abordaremos de manera integral los hallazgos clave, discutiremos las implicaciones de estos resultados.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se implementó un proceso de simulación utilizando FEM y un DOE con la metodología de Taguchi para optimizar el proceso de MA de una bobina de inducción electromagnética mediante el método PBF. Los principales hallazgos fueron los siguientes:

- Se logró establecer una metodología de simulación para determinar los parámetros de construcción ideales. Se replicaron computacionalmente las condiciones de operación de la impresora, controlando algunos parámetros como: potencia del láser (P), velocidad de escaneo (V), espacio entre pistas de soldadura (h) y ancho de capa (t). Además, algunos parámetros como la temperatura de la cámara, temperatura de la placa de construcción, temperatura del polvo, velocidad de repintado y diámetro del láser se consideraron constantes.
- Mediante el diseño de experimentos de Taguchi, se propuso un esquema de simulaciones para determinar de manera estadística qué parámetros influyen mayormente en las distorsiones y esfuerzos residuales de la pieza.
- Se encontró que los parámetros de proceso relevantes para distorsiones y esfuerzos residuales son la velocidad de escaneo (V) y la potencia del láser (P), con estos dos parámetros se logra controlar el cordón de soldadura y la fusión del material en polvo.
- Con los parámetros de impresión $P = 300$ W, $V = 700$ mm/s, $h = 0.13$ mm, y $t = 0.8$ mm, se logró obtener la mínima deformación que fue de 0.24 mm y los mínimos esfuerzos residuales que fueron de 459 MPa. Estos resultados se encuentran dentro de los parámetros aceptables para la deformación, y con la magnitud de esfuerzo obtenida, no se presentarán fracturas en la pieza durante el proceso de impresión.

Es importante destacar que las simulaciones del proceso de impresión ayudan a establecer parámetros de proceso de impresión que disminuyen la distorsión y los

esfuerzos residuales en la pieza. Además, las simulaciones pueden disminuir el tiempo de fabricación y el desecho de material en polvo debido a que los experimentos para determinar los parámetros de impresión ideales, se sustituyen por la simulación por MEF. Estos hallazgos, contribuyen al avance de la fabricación aditiva y ofrecen una guía útil para futuros desarrollos y aplicaciones en la industria, disminuyendo los errores de construcción y costo de fabricación de las piezas por el método PBF.

REFERENCIAS

- [1] M. Sarap, A. Kallaste, P.S. Ghahfarokhi, H. Tiismus, T. Vaimann, Utilization of Additive Manufacturing in the Thermal Design of Electrical Machines: A Review, *Machines*. 10 (2022). <https://doi.org/10.3390/machines10040251>.
- [2] E.A. Salazar Fiallos, Análisis de esfuerzos producidos en el semieje de un vehículo de tracción delantera, en función del tamaño y material del rin y neumático, mediante uso de software CAE, Universidad De Las Fuerzas Armadas, 2021.
- [3] F. Rosales Iriarte, Diseño y análisis de un sistema de transmisión de velocidad variable para un auto SAE MINI BAJA, México D. F., 2003.
- [4] M. Yakout, M.A. Elbestawi, S.C. Veldhuis, A review of metal additive manufacturing technologies, in: *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publications Ltd, 2018: pp. 1–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>.
- [5] ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology, ISO/ASTM 52900. (2015).
- [6] F. Doreau, C. Chaput, T. Chartier, Stereolithography for manufacturing ceramic parts, *Adv Eng Mater*. 2 (2000) 493–496. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200008\)2:8<493::AID-ADEM493>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200008)2:8<493::AID-ADEM493>3.0.CO;2-C).
- [7] C. Bellini, F. Berto, V. Di Cocco, F. Iacoviello, L.P. Mocanu, J. Razavi, Additive manufacturing processes for metals and effects of defects on mechanical strength: A review, in: *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2021: pp. 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.057>.
- [8] J.J.S. Dilip, S. Zhang, C. Teng, K. Zeng, C. Robinson, D. Pal, B. Stucker, Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting, *Progress in Additive Manufacturing*. 2 (2017) 157–167. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0030-2>.

- [9] F.H. Kim, S.P. Moylan, Literature review of metal additive manufacturing defects, Gaithersburg, MD, 2018. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-16>.
- [10] K. Jahns, R. Bappert, P. Böhlke, U. Krupp, Additive manufacturing of CuCr1Zr by development of a gas atomization and laser powder bed fusion routine, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107 (2020) 2151–2161. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04941-7>.
- [11] H. Gong, H. Gu, K. Zeng, J.J.S. Dilip, D. Pal, B. Stucker, D. Christiansen, J. Beuth, J.J. Lewandowski, Melt Pool Characterization for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Pre-alloyed Powder, n.d.
- [12] J.P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Ann Manuf Technol*. 56 (2007) 730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>.
- [13] H.L. Torres García, Desarrollo e implementación de modelo de predicción en procesos de temple por inducción para un acero AISI-SAE 1043, n.d.
- [14] A. ACEVEDO PICON ingeniero Electrónico Profesor Auxiliar, J. BARRERO PÉREZ Ingeniero Electricista Profesor Titular, J. AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO Ingeniero Electricista Profesor Titular, CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO, n.d.
- [15] J.N. Hincapié, A. Trejos, M.E. Moncada, A. Escobar, Ingeniería y Ciencia Electrónica de potencia para el calentamiento por inducción doméstico: revisión del estado del arte, *Ing. Cienc.* 9 (n.d.). <http://www.eafit.edu.co/ingciencia>.
- [16] A. Balbás Calvo, M. del M. Espinosa, M. Domínguez Somonte, Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos, *Lámpsakos*. (2018) 47–54. <https://doi.org/10.21501/21454086.2365>.
- [17] K. V. Wong, A. Hernandez, A Review of Additive Manufacturing, *ISRN Mechanical Engineering*. 2012 (2012) 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>.

- [18] L. Kudrna, Q.P. Ma, J. Hajnys, J. Mesicek, R. Halama, F. Fojtik, L. Hornacek, Restoration and Possible Upgrade of a Historical Motorcycle Part Using Powder Bed Fusion, *Materials*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15041460>.
- [19] S. Jawade, G. Kakandikar, Relationship modelling for surface finish for laser-based additive manufacturing, *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. (2022). <https://doi.org/10.5599/jese.1286>.
- [20] E.F. Valero, 5. EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF ó FEM). 5.1. El método general. 5.1.1. Definición del método, n.d.
- [21] D.L. Logan, *A first course in the finite element method*, Thomson, 2007.
- [22] C. Körner, M. Markl, J.A. Koepf, Modeling and Simulation of Microstructure Evolution for Additive Manufacturing of Metals: A Critical Review, *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*. 51 (2020) 4970–4983. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05946-3>.
- [23] M. Pagac, J. Hajnys, R. Halama, T. Aldabash, J. Mesicek, L. Jancar, J. Jansa, Prediction of model distortion by fem in 3d printing via the selective laser melting of stainless steel aisi 316l, *Applied Sciences (Switzerland)*. 11 (2021) 1–16. <https://doi.org/10.3390/app11041656>.
- [24] N. Peter, Z. Pitts, S. Thompson, A. Saharan, Benchmarking build simulation software for laser powder bed fusion of metals, *Addit Manuf*. 36 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101531>.
- [25] M.R. Hill, D. Nelson, M.R. Hill, D. V Nelson, *The Inherent Strain Method For Residual Stress Determination And Its Application To A Long Welded Joint*, 1999. <https://www.researchgate.net/publication/2416530>.
- [26] N. Ma, K. Nakacho, T. Ohta, N. Ogawa, A. Maekawa, H. Huang, H. Murakawa, Inherent Strain Method for Residual Stress Measurement and Welding Distortion Prediction, in: *ASME International*, 2016. <https://doi.org/10.1115/omae2016-54184>.
- [27] H. Alzyod, P. Ficzer, Using Finite Element Analysis in the 3D Printing of Metals, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*. 49 (2021) 65–70. <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-24>.

- [28] H. Peng, M. Ghasri-Khouzani, S. Gong, R. Attardo, P. Ostiguy, B.A. Gatrell, J. Budzinski, C. Tomonto, J. Neidig, M.R. Shankar, R. Billo, D.B. Go, D. Hoelzle, Fast prediction of thermal distortion in metal powder bed fusion additive manufacturing: Part 1, a thermal circuit network model, *Addit Manuf.* 22 (2018) 852–868. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.023>.
- [29] H. Peng, M. Ghasri-Khouzani, S. Gong, R. Attardo, P. Ostiguy, R.B. Rogge, B.A. Gatrell, J. Budzinski, C. Tomonto, J. Neidig, M.R. Shankar, R. Billo, D.B. Go, D. Hoelzle, Fast prediction of thermal distortion in metal powder bed fusion additive manufacturing: Part 2, a quasi-static thermo-mechanical model, 2018.
- [30] M. Leoben, A.M. Bastús, NUMERICAL SENSITIVITY STUDY OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION IN SELECTIVE LASER MELTING OF 17-4 PH STEEL created at the Chair of Mechanical Engineering, n.d.
- [31] H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar, Análisis y diseño de experimentos, n.d. www.FreeLibros.org.
- [32] F. Naranjo Palacios, A.J. Rios Lira, Y.V. Pantoja Pacheco, M. Tapia Esquivias, Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados, *Ingeniería Investigación y Tecnología.* 21 (2020) 1–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.011>.
- [33] D.C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, II, 2005.
- [34] P.D. Medina V., E.A. Cruz T., J.H. Restrepo, APLICACIÓN DEL MODELO DE EXPERIMENTACION TAGUCHI EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA, 34 (2007).
- [35] F. Sun, P. Liu, X. Chen, H. Zhou, P. Guan, B. Zhu, Mechanical properties of high-strength cu–cr–zr alloy fabricated by selective laser melting, *Materials.* 13 (2020) 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma13215028>.
- [36] J. Li, Z. Kuai, Z. Li, B. Liu, Y. Chen, S. Lu, Y. Nie, Z. Yang, Effects of Process Parameters on the Relative Density and Properties of CuCrZr Alloy Produced by Selective Laser Melting, *Metals (Basel).* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/met12050701>.

- [37] K. Jahns, R. Bappert, P. Böhlke, U. Krupp, Additive manufacturing of CuCr1Zr by development of a gas atomization and laser powder bed fusion routine, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107 (2020) 2151–2161. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04941-7>.
- [38] K. Artzt, M. Siggel, J. Kleinert, J. Riccius, G. Requena, J. Haubrich, Pyrometric-based melt pool monitoring study of CuCr1Zr processed using L-PBF, *Materials*. 13 (2020) 1–22. <https://doi.org/10.3390/ma13204626>.
- [39] Y. Birol, Thermal fatigue testing of CuCrZr alloy for high temperature tooling applications, in: *J Mater Sci*, 2010: pp. 4501–4506. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4542-0>.
- [40] J. Wisniewski, J.-M. Drezet, D. Ayrault, B. Cauwe, Determination of the thermophysical properties of a CuCr1Zr alloy from liquid state down to room temperature, (n.d.). <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0>.
- [41] S.P. Goyal, M. Lashkari, A. Elsayed, M. Hahn, A.E. Tekkaya, Analysis of proximity consequences of coil windings in electromagnetic forming, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 5 (2021). <https://doi.org/10.3390/jmmp5020045>.
- [42] X.W. Zhang, Q.J. Wang, X. Zhou, B. Liang, Tensile Behavior of High Temperature Cu-Cr-Zr Alloy, 2015.
- [43] T. Wegener, J. Koopmann, J. Richter, P. Krooß, T. Niendorf, CuCrZr processed by laser powder bed fusion—Processability and influence of heat treatment on electrical conductivity, microstructure and mechanical properties, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 44 (2021) 2570–2590. <https://doi.org/10.1111/ffe.13527>.
- [44] X. Tang, X. Chen, F. Sun, P. Liu, H. Zhou, S. Fu, The current state of CuCrZr and CuCrNb alloys manufactured by additive manufacturing: A review, *Mater Des*. 224 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111419>.
- [45] Ö. Poyraz, E. Yasa, L.T. Tunç, K. Kılıçay, Parametric simulations for residual stresses and distortions of Inconel 625 fabricated by laser powder

bed fusion additive manufacturing, *Journal of Additive Manufacturing Technologies*. (2021). <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111530>.

- [46] Q.P. Ma, J. Mesicek, F. Fojtik, J. Hajnys, P. Krpec, M. Pagac, J. Petru, Residual Stress Build-Up in Aluminum Parts Fabricated with SLM Technology Using the Bridge Curvature Method, *Materials*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15176057>.

ANEXOS

ANEXO A. Matriz de simulaciones y resultados numéricos para deformación y esfuerzos

ARREGLO L18						Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)
Número de corrida	$t(\text{mm})$	$P(\text{W})$	$V(\text{mm/s})$	$h(\text{mm})$	$E(\text{J/mm}^3)$	Max	Max
1	0.08	400	300	0.07	238.0952	4.70E-01	8.63E+02
2	0.08	400	500	0.1	100	2.93E-01	5.39E+02
3	0.08	400	700	0.13	54.94505	2.41E-01	4.59E+02
4	0.08	500	300	0.07	297.619	5.97E-01	1.08E+03
5	0.08	500	500	0.1	125	3.44E-01	6.35E+02
6	0.08	500	700	0.13	68.68132	2.69E-01	4.71E+02
7	0.08	700	300	0.1	291.6667	5.62E-01	1.02E+03
8	0.08	700	500	0.13	134.6154	4.05E-01	7.30E+02
9	0.08	700	700	0.07	178.5714	4.25E-01	7.88E+02
10	0.1	400	300	0.1	133.3333	3.92E-01	7.22E+02
11	0.1	400	500	0.07	114.2857	3.45E-01	6.33E+02
12	0.1	400	700	0.1	57.14286	2.77E-01	5.10E+02
13	0.1	500	300	0.1	166.6667	4.67E-01	8.62E+02
14	0.1	500	500	0.13	76.92308	3.17E-01	5.82E+02
15	0.1	500	700	0.07	102.0408	3.39E-01	6.24E+02
16	0.1	700	300	0.13	179.4872	4.66E-01	8.51E+02
17	0.1	700	500	0.07	200	5.65E-01	1.03E+03
18	0.1	700	700	0.1	100	3.61E-01	6.66E+02

ANEXO B DEFORMACIONES

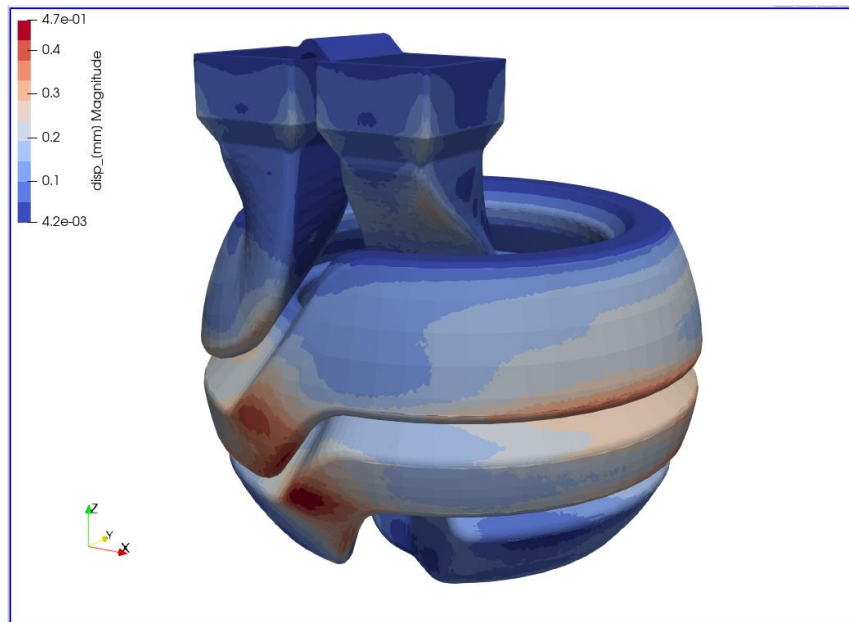


Figura B1. Resultado grafico de deformación para simulación número 1

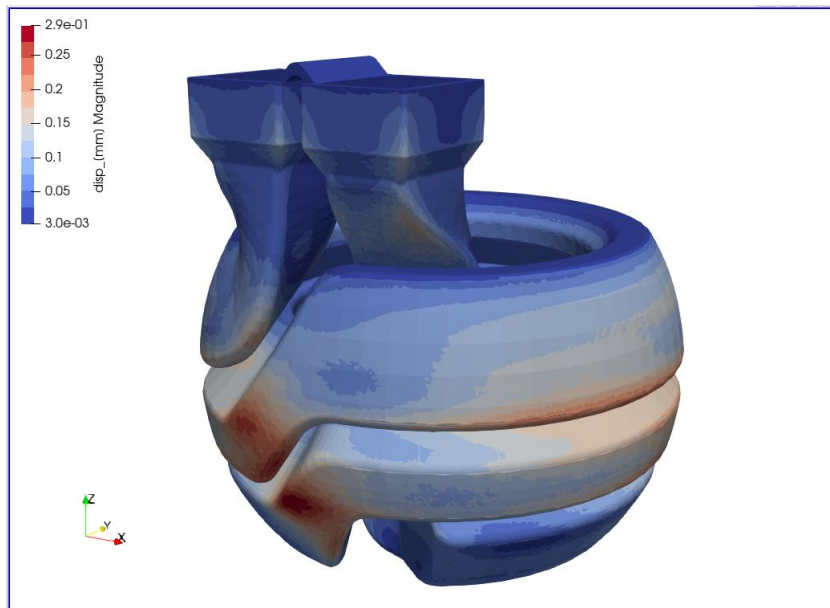


Figura B2. Resultado grafico de deformación para simulación número 2

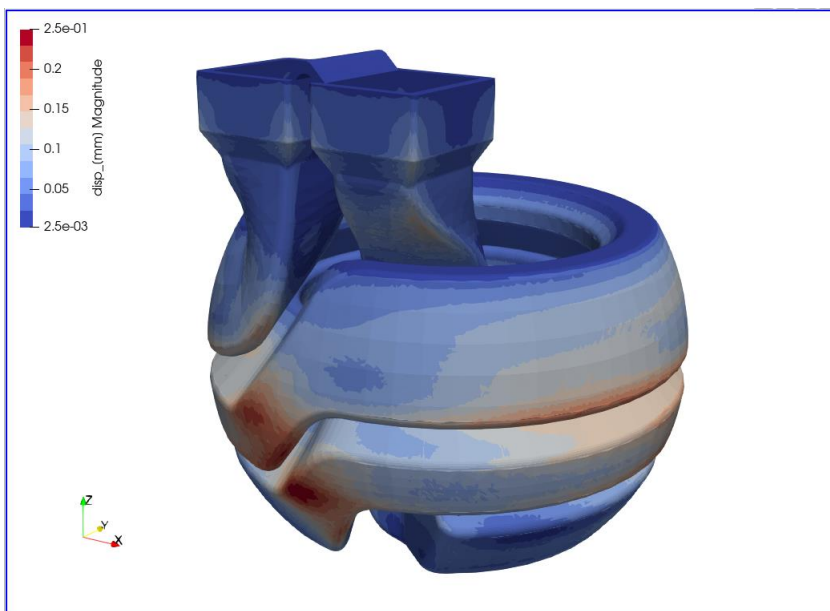


Figura B3. Resultado grafico de deformación para simulación número 3

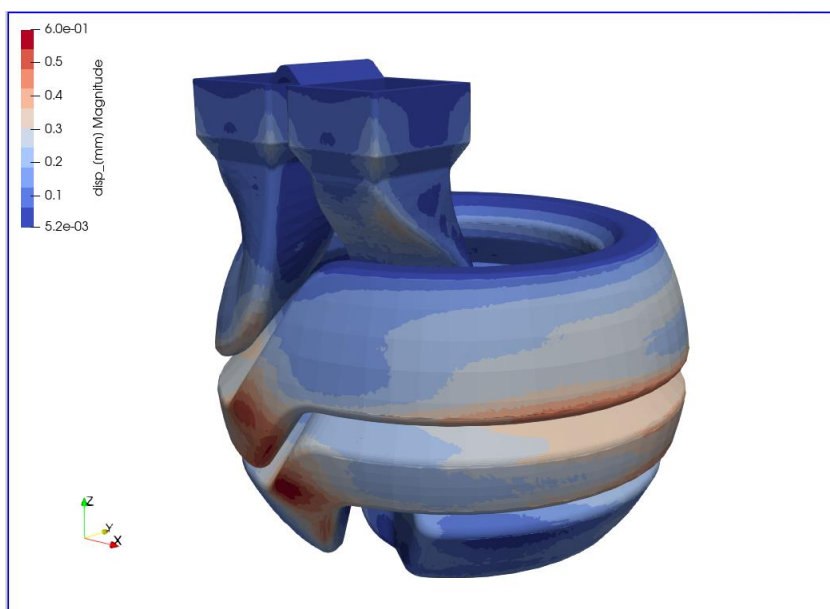


Figura B4. Resultado grafico de deformación para simulación número 4

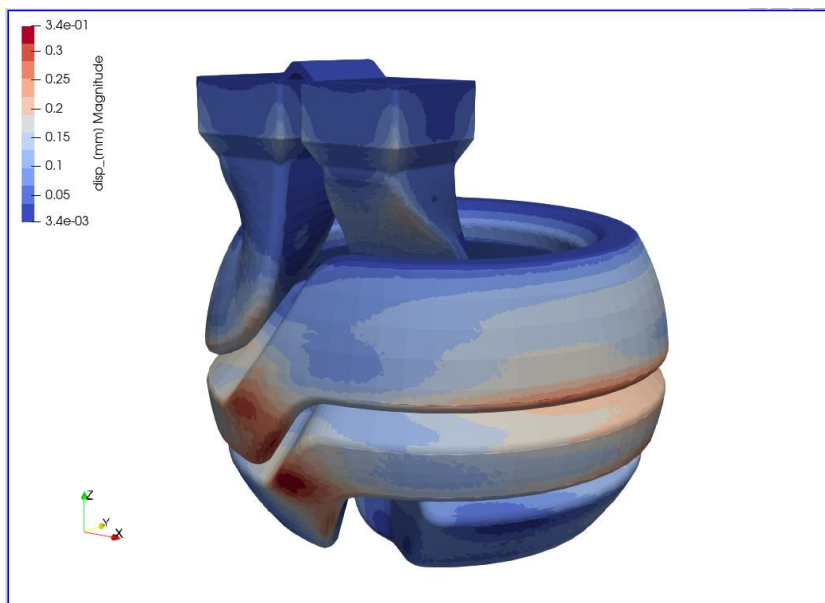


Figura B5. Resultado grafico de deformación para simulación número 5

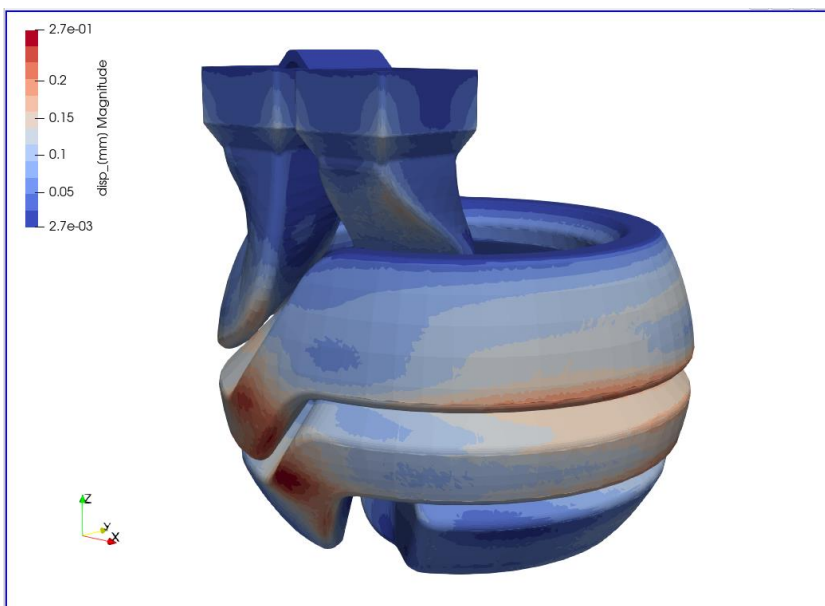


Figura B6. Resultado grafico de deformación para simulación número 6

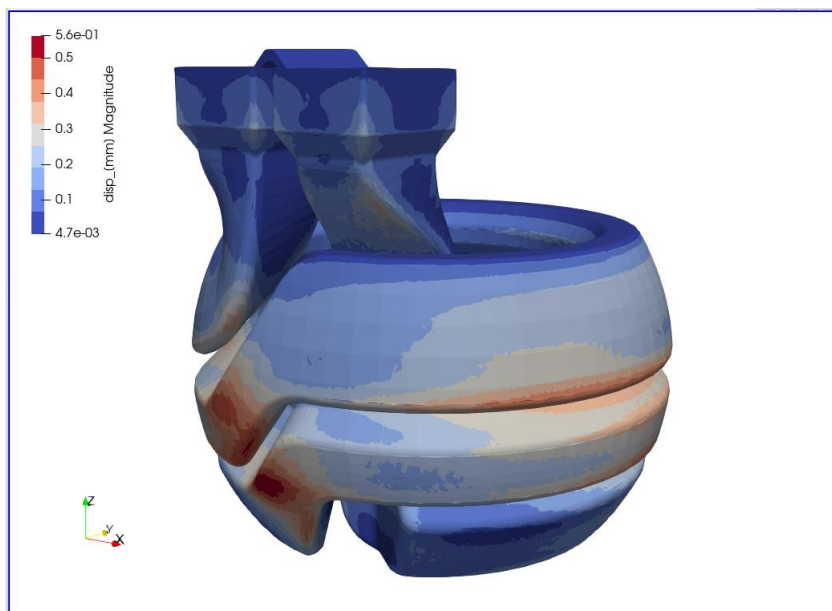


Figura B7. Resultado grafico de deformación para simulación número 7



Figura B8. Resultado grafico de deformación para simulación número 8

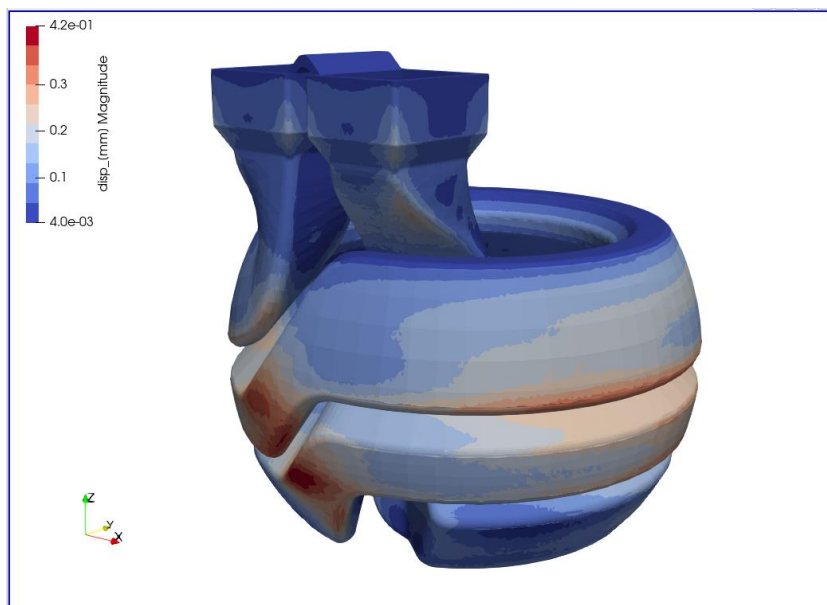


Figura B9. Resultado grafico de deformación para simulación número 9

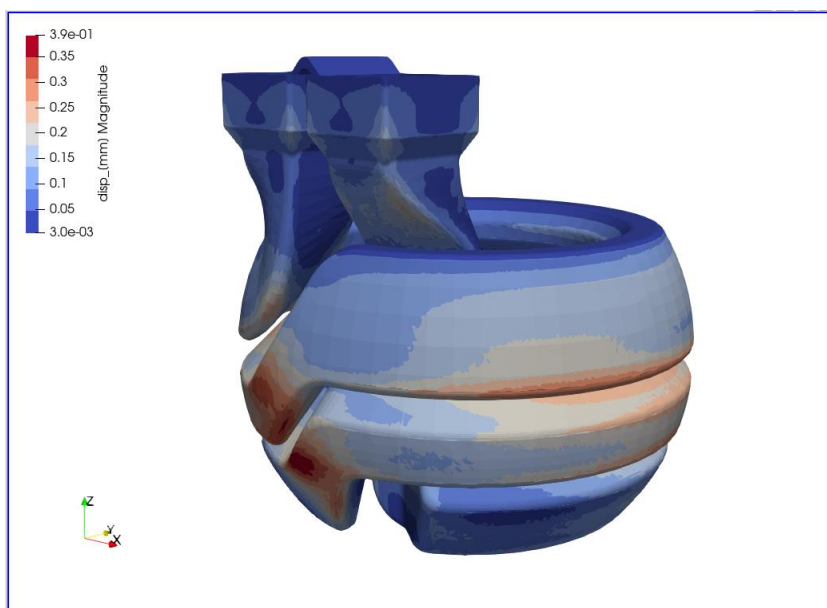


Figura B10. Resultado grafico de deformación para simulación número 10

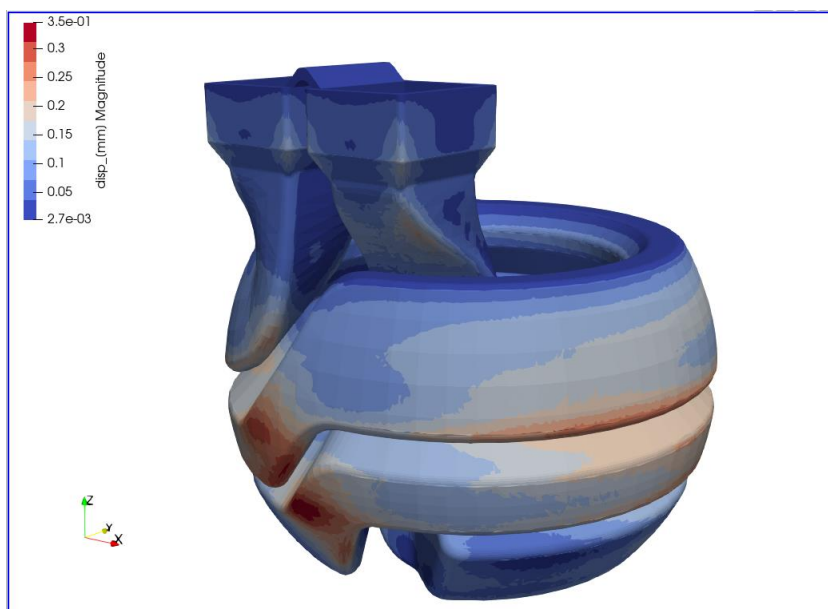


Figura B11. Resultado grafico de deformación para simulación número 11

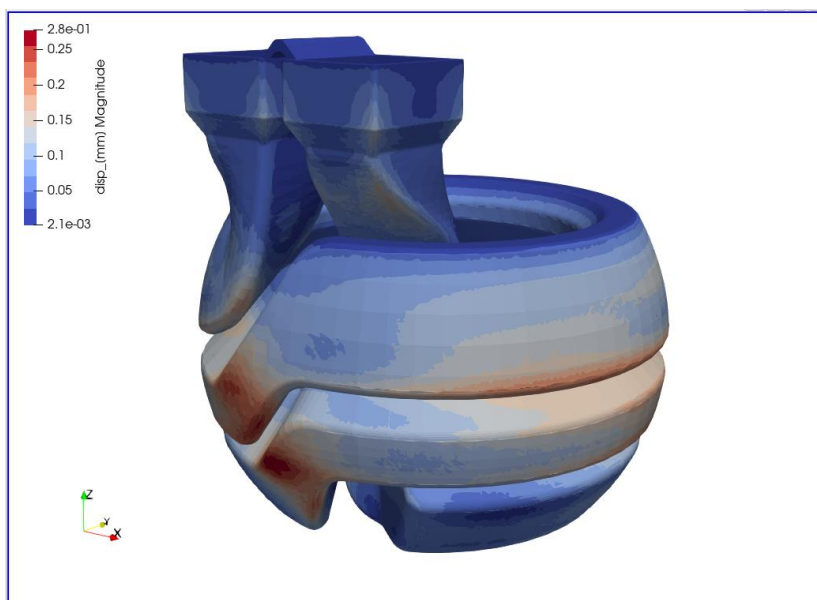


Figura B12. Resultado grafico de deformación para simulación número 12

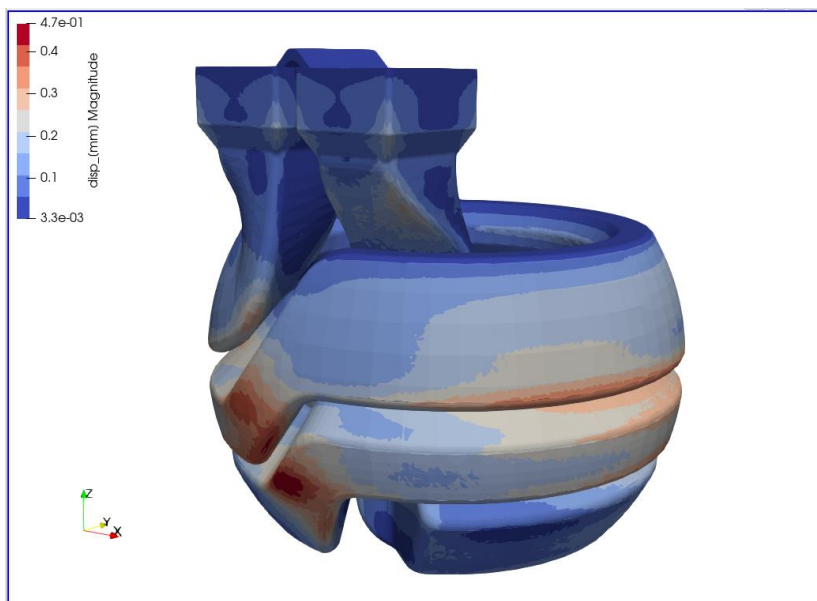


Figura B13. Resultado grafico de deformación para simulación número 13

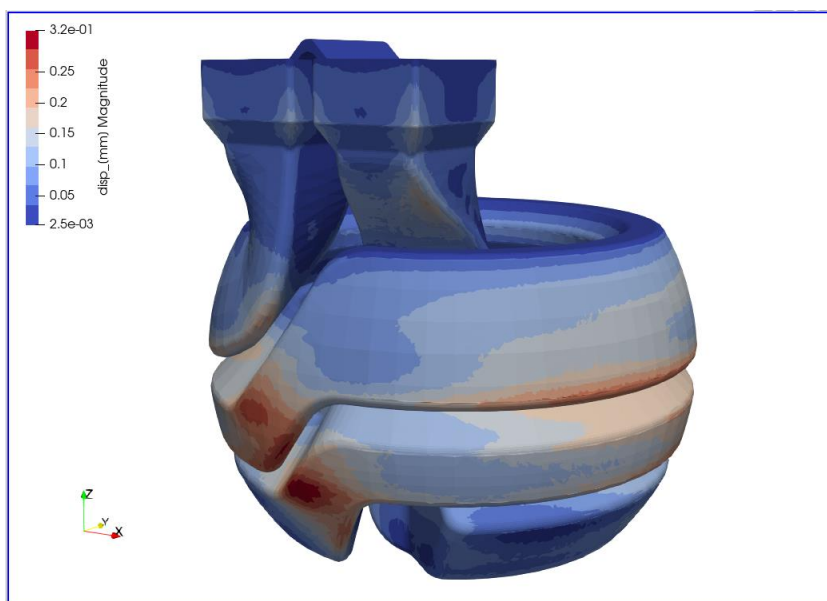


Figura B14. Resultado grafico de deformación para simulación número 14

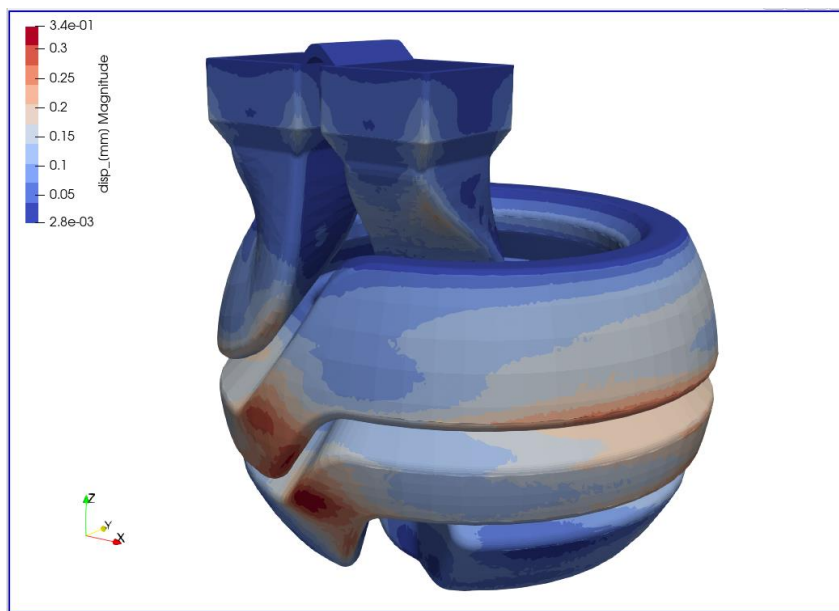


Figura B15. Resultado grafico de deformación para simulación número 15

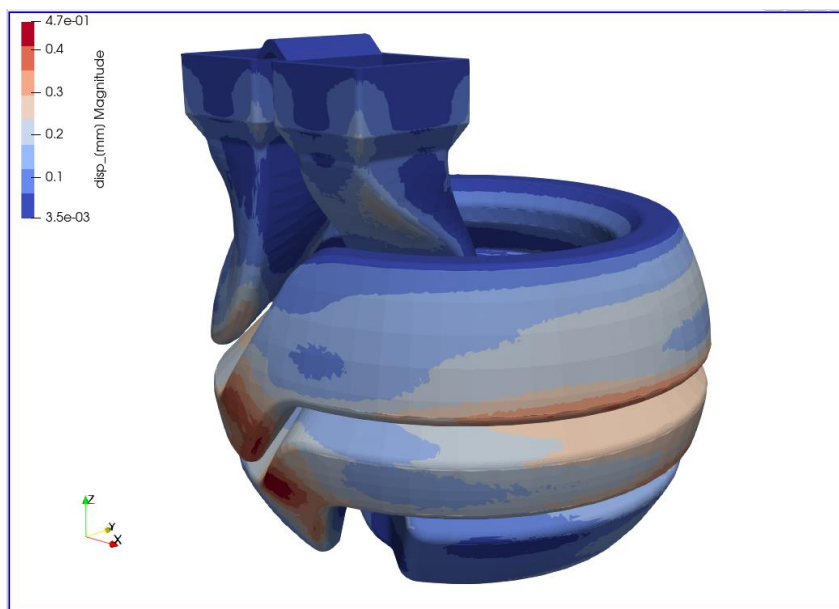


Figura B16. Resultado grafico de deformación para simulación número 16

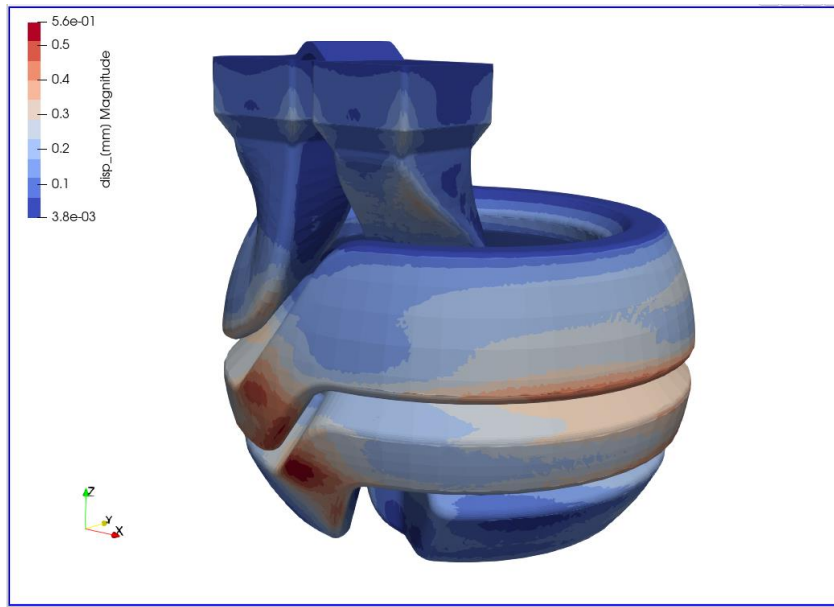


Figura B17. Resultado grafico de deformación para simulación número 17

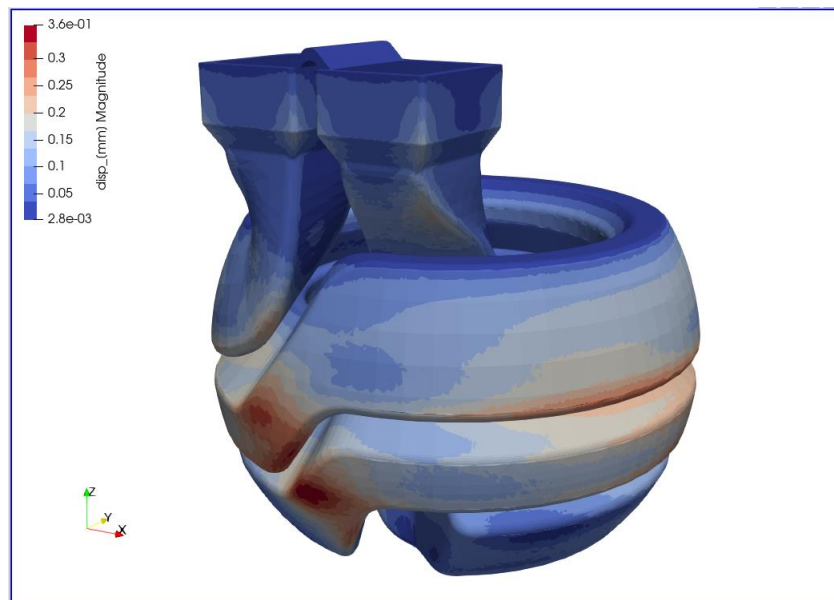


Figura B18. Resultado grafico de deformación para simulación número 18

ANEXO C ESFUERZOS

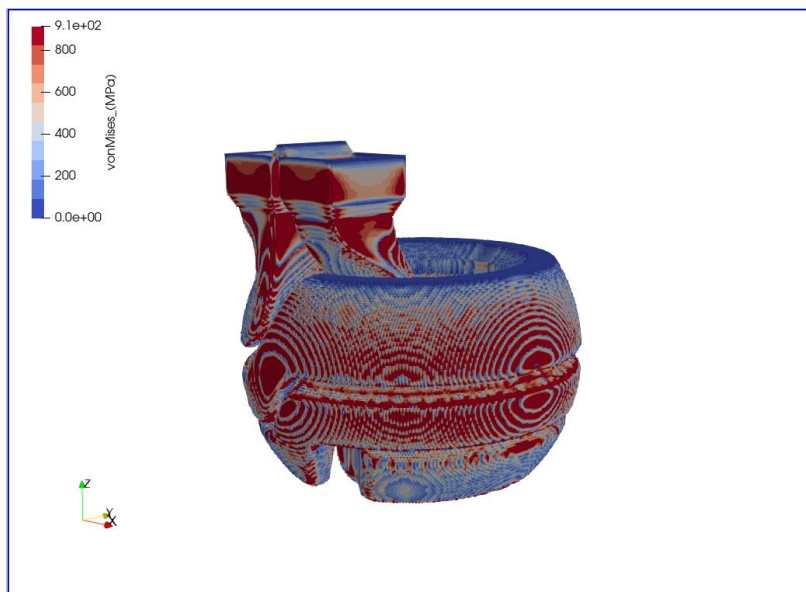


Figura C1. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 1

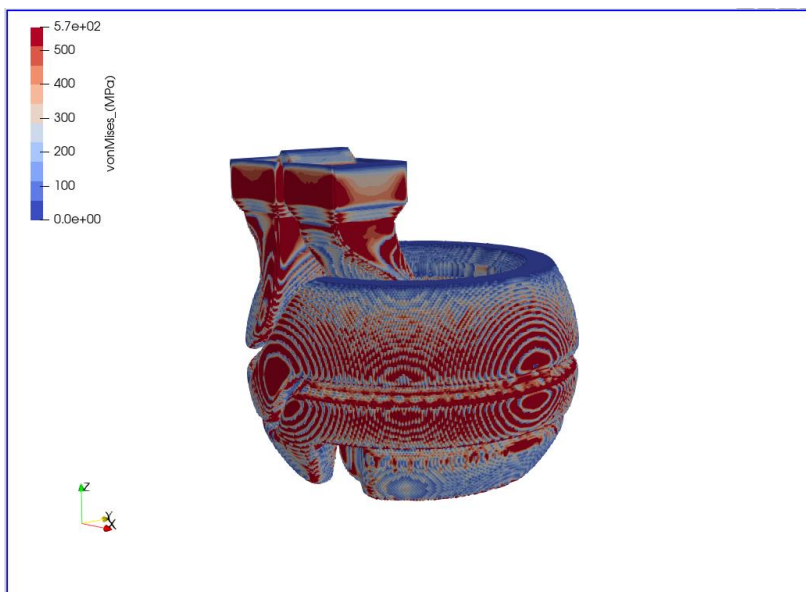


Figura C2. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 2

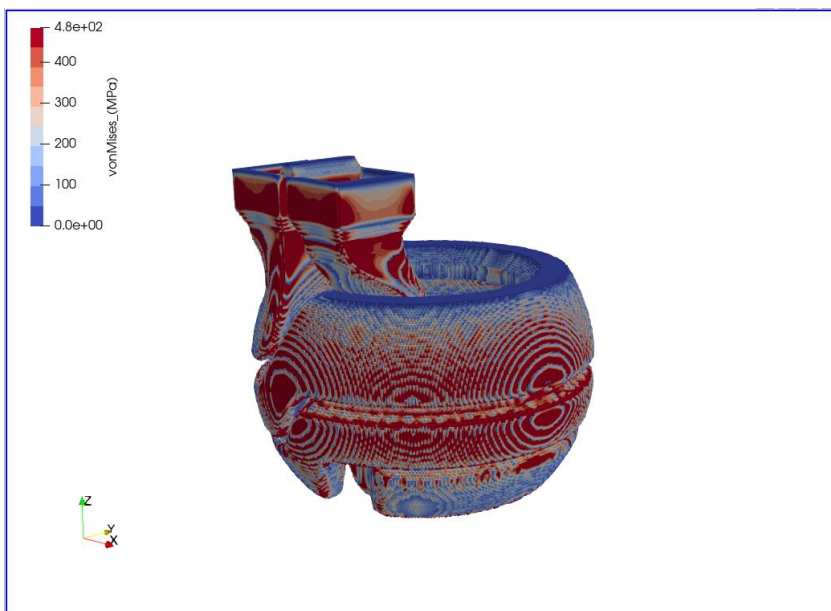


Figura C3. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 3

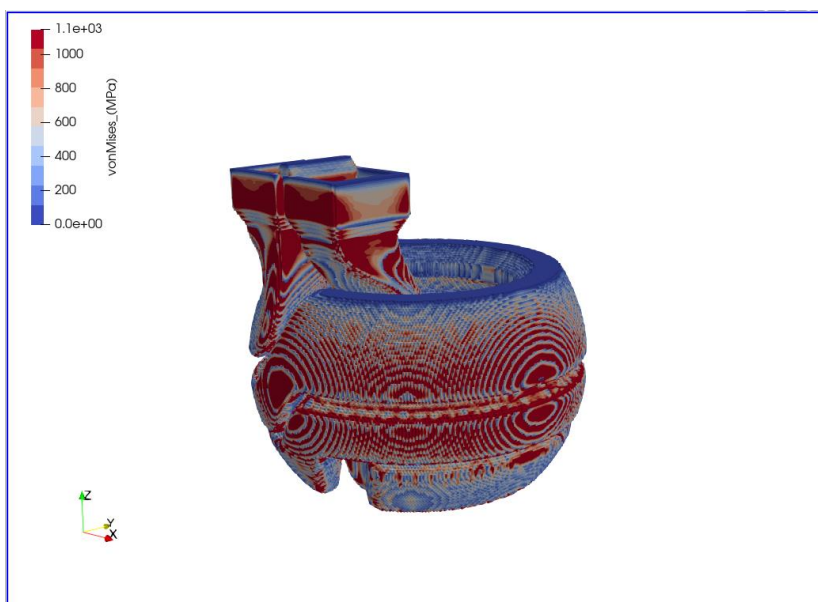


Figura C4. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 4

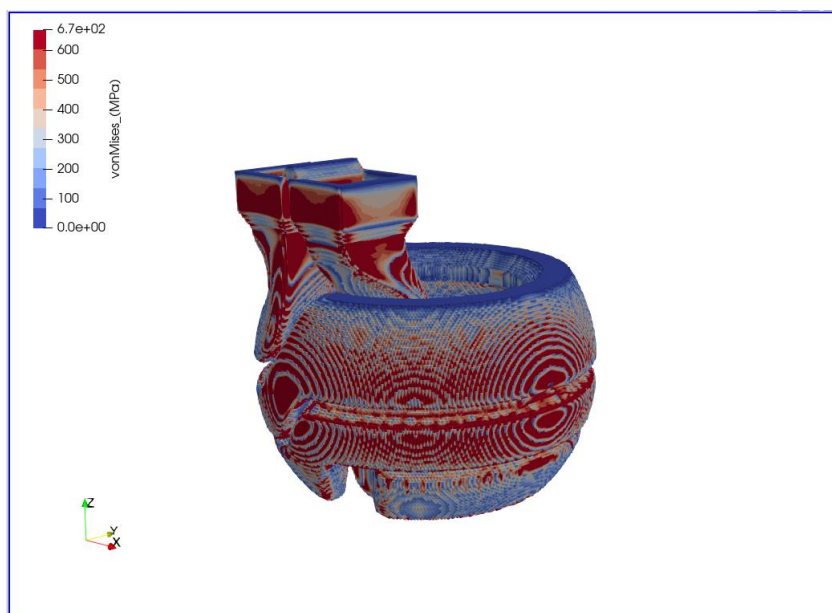


Figura C5. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 5

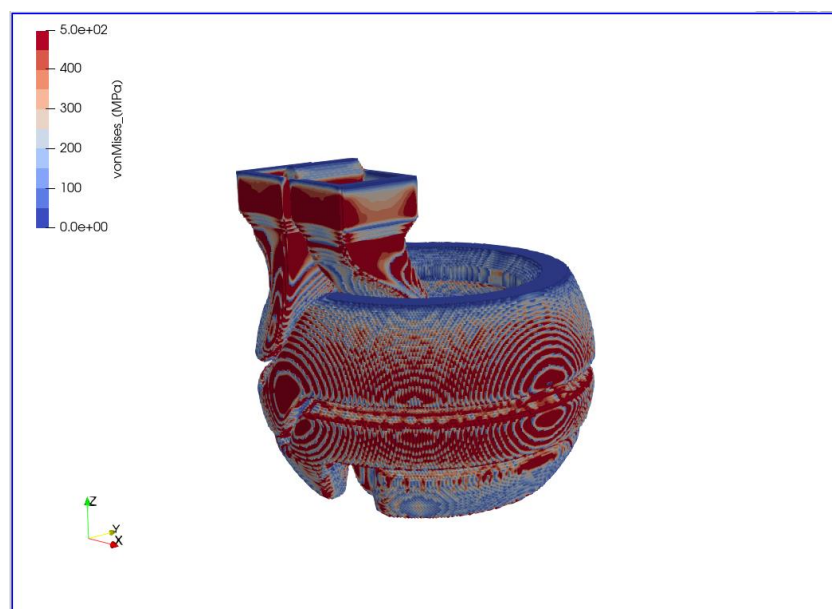


Figura C6. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 6

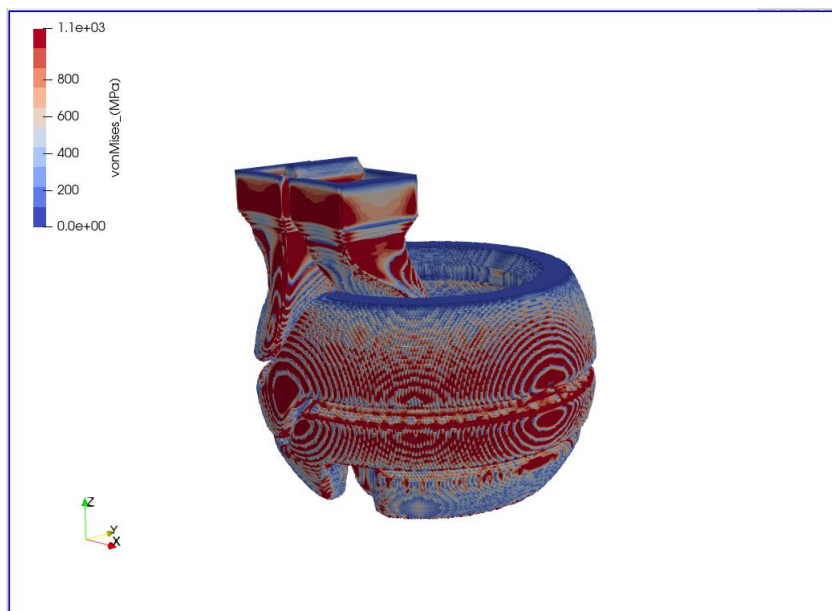


Figura C7. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 7



Figura C8. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 8

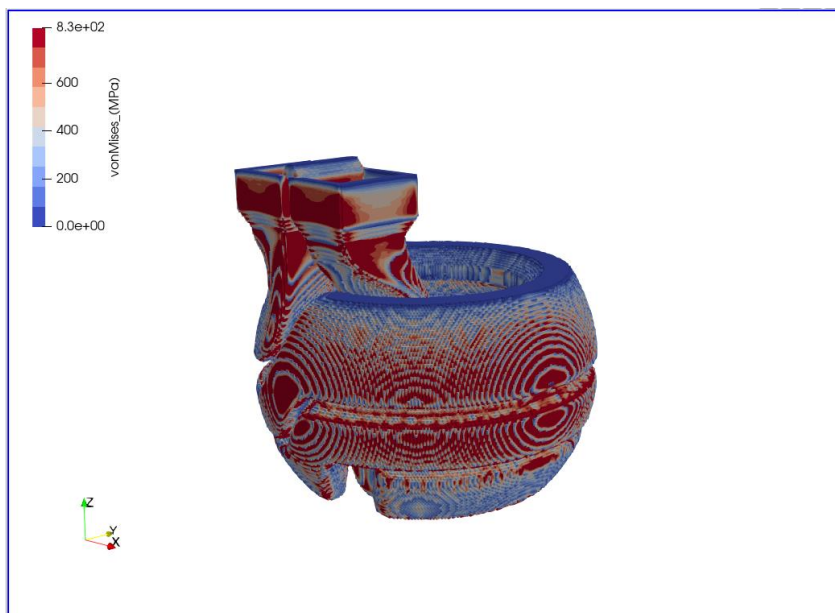


Figura C9. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 9

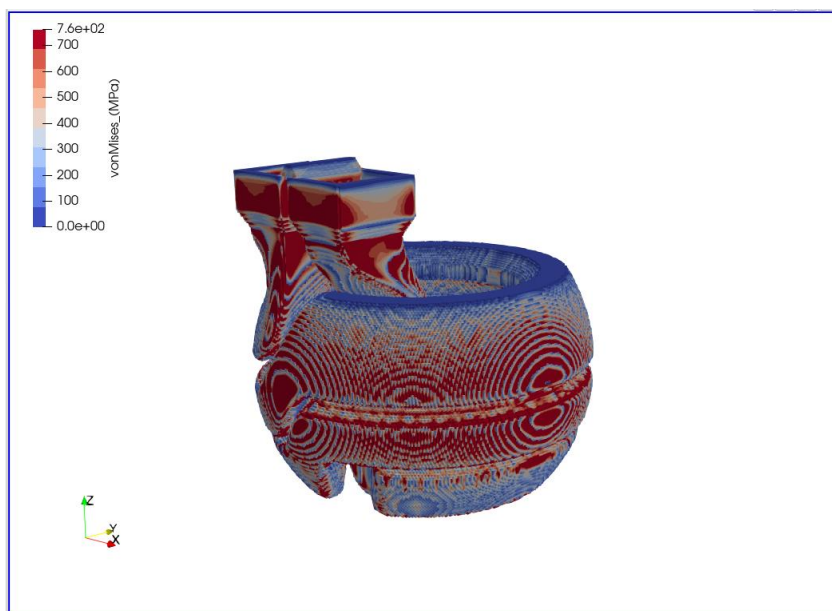


Figura C10. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 10

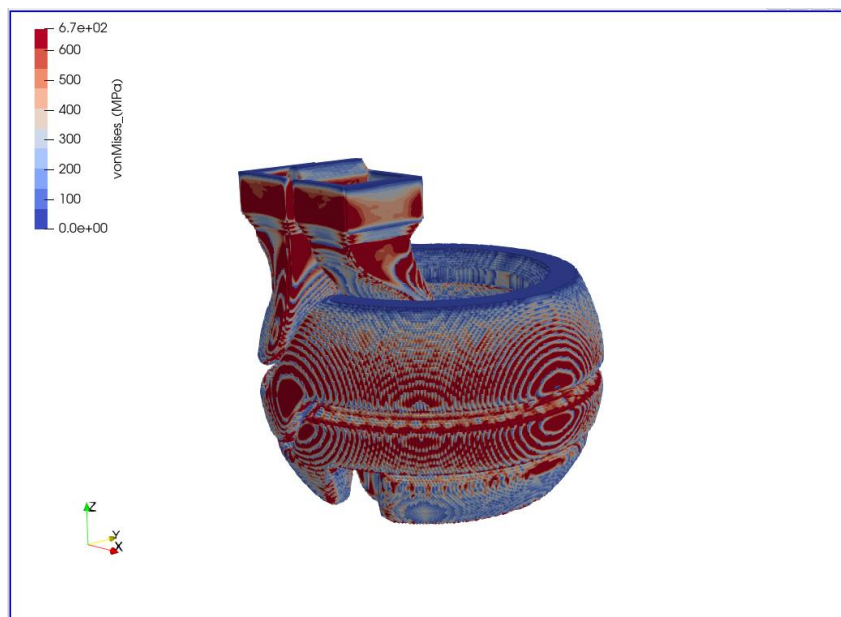


Figura C11. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 11

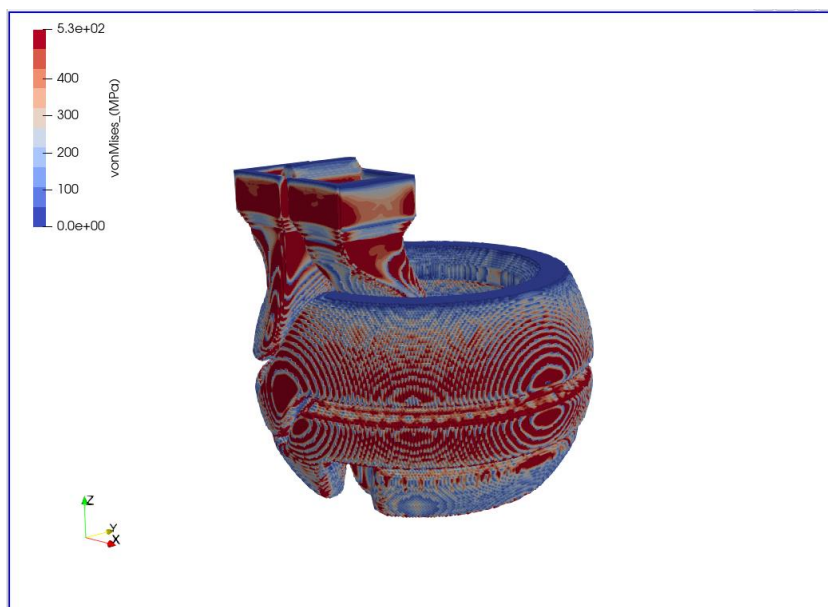


Figura C12. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 12

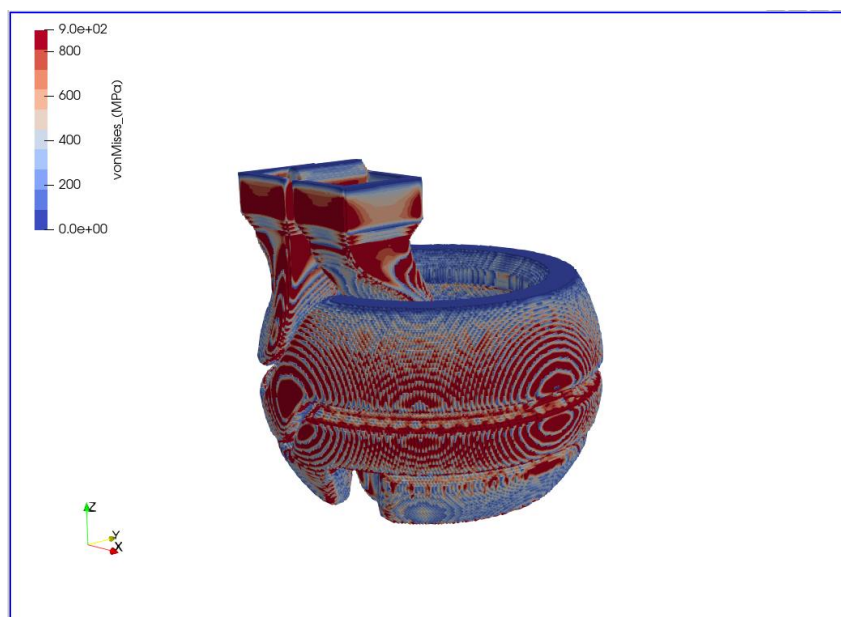


Figura C13. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 13

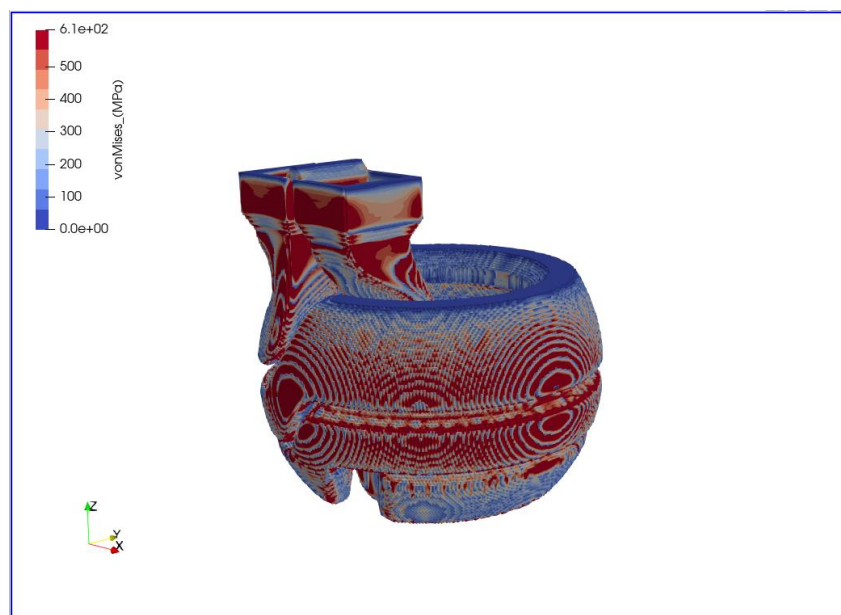


Figura C14. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 14

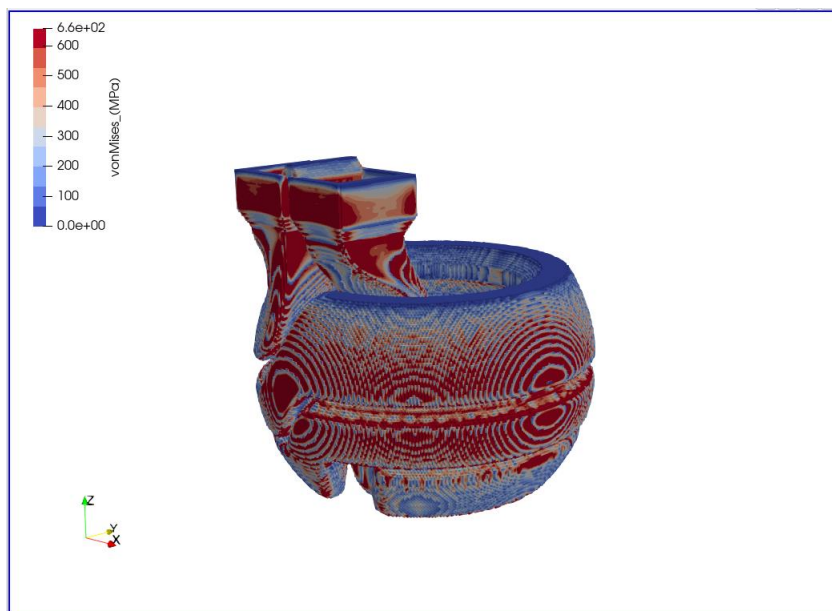


Figura C15. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 15

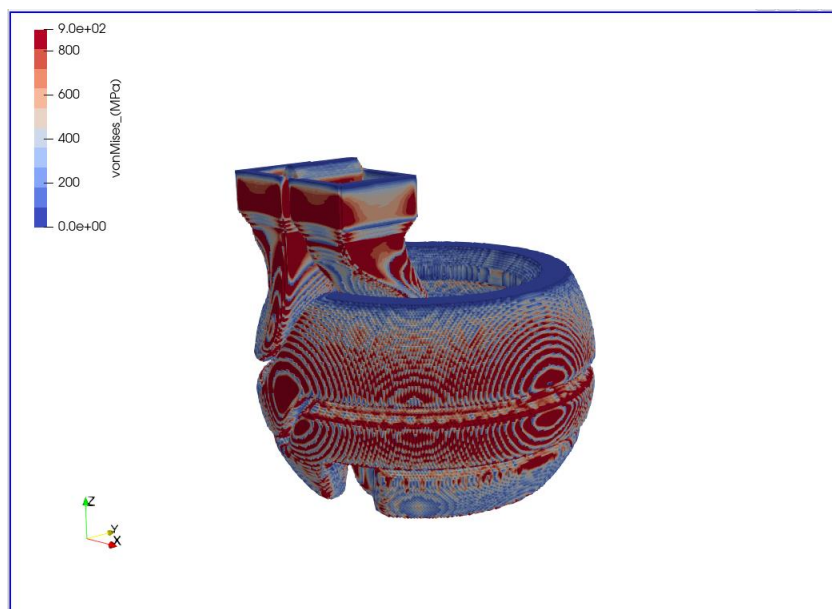


Figura C16. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 16

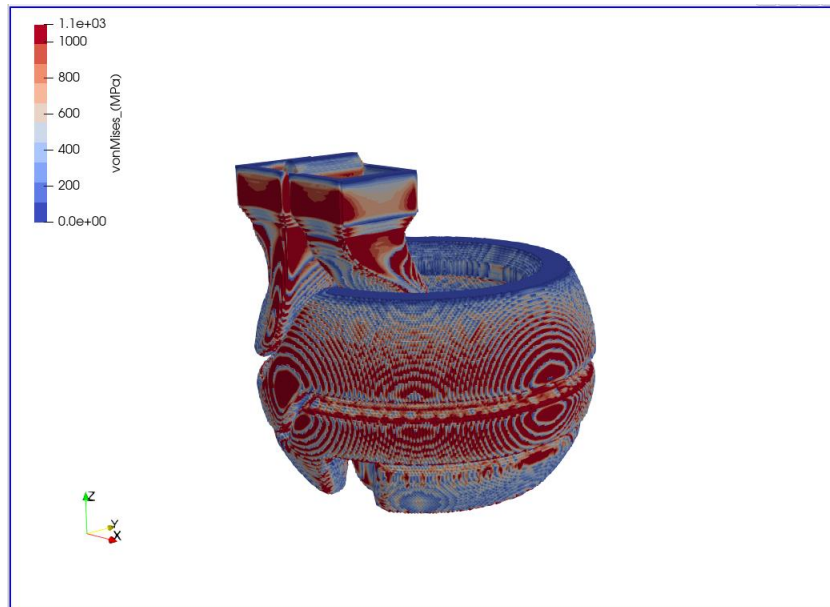


Figura C17. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 17

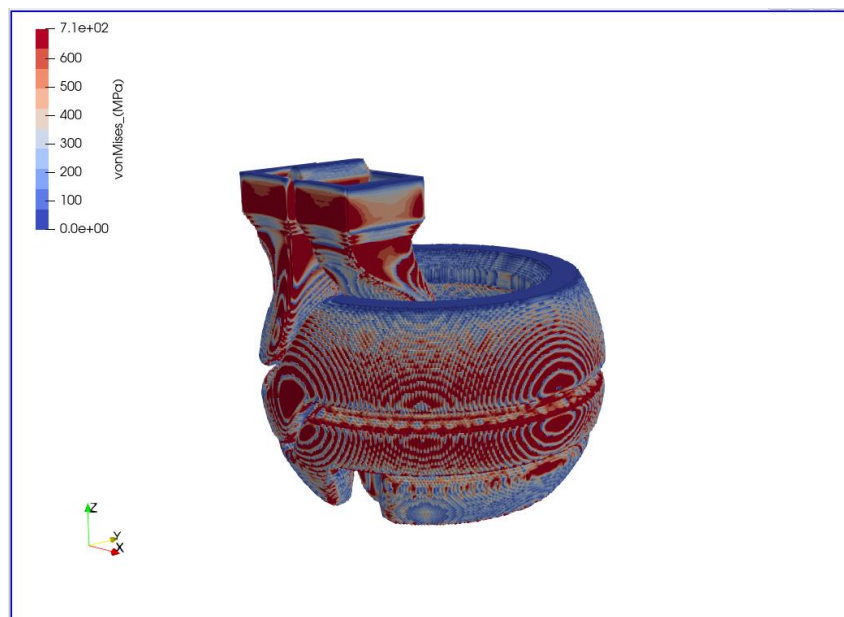


Figura C18. Resultado grafico de esfuerzos residuales para simulación número 18