

VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS POR ENSAYO DE Tensión DEL ACERO 17-4 PH

MARÍA JOSÉ VARGAS PÉREZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, Diciembre 01 de 2022

VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS POR ENSAYO DE TENSIÓN DEL ACERO 17-4 PH

MARÍA JOSÉ VARGAS PÉREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director

CHRISTIAN FÉLIX MARTÍNEZ

Dr. En Ciencias

christian.felix@cidesi.edu.mx

Codirector

LUZ KARIME HERNÁNDEZ GEGEN

Dra. En Tecnologías de Avanzadas de Producción

lukahege@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, Diciembre 01 de 2022

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre por su paciencia, consejos y su apoyo siempre, sin ella no habría sido posible escribir este libro, a mi padre por su apoyo en esta etapa de mi vida y a mis abuelitos que desde el cielo me dieron la inspiración y la fuerza para seguir adelante.

“Cumplir los sueños, viene del esfuerzo y el sacrificio que se haga”

María José Vargas Pérez

“Con el simple hecho de que estés allá, es un logro, si te va bien mucho mejor”

Jorge Aníbal Pérez Ovallos

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, por brindarme la oportunidad de llegar hasta este momento tan importante en mi vida, a mi Mamá, a mi Papá, a mi Tío Padre y Familia por tenerme tanta paciencia en este proceso y darme su apoyo.

Agradezco a la Universidad de Pamplona por darme la oportunidad de pertenecer al programa de Ingeniería Mecánica y al programa por permitirme realizar este proyecto tan lindo e importante para mí y por el apoyo.

Al Dr. Enrique Martínez por presentarme a mi Director, al Centro de Ingeniería y Desarrollo industrial (CIDESI) y al consorcio CONACYT de Manufactura Aditiva (CONMAD) por el apoyo con los ensayos experimentales.

A mi Director de tesis el Doctor Christian Félix, por darme la oportunidad, el apoyo incondicional y el tiempo dedicado al proyecto, agradezco también a mi Codirectora la Doctora Luz Karime Hernández por mostrarme el camino, por su tiempo y dedicación.

Por último, agradezco al profesor Edison Martínez, al profesor Rafael Bolívar y al profesor Antonio Velasco por el conocimiento aportado al proyecto en temas de materiales y simulación; y a mis amigos por siempre apoyarme y subirme el ánimo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	2
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. OBJETIVOS	3
3.1 OBJETIVO GENERAL	3
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
4. ESTADO ACTUAL	4
4.1 FABRICACIÓN AVANZADA	5
4.2 PROCESOS AVANZADOS DE MANUFACTURA	6
4.3 MANUFACTURA ADITIVA	7
4.4 INNOVACIÓN EN LA FABRICACIÓN ADITIVA	9
4.5 MANUFACTURA ADITIVA DE METALES.....	10
4.6 PROCESO DE FUSIÓN POR CAMA DE POLVO	12
4.7 ACERO INOXIDABLE 17-4 PH	15
4.8 MICROESTRUCTURA EN ADITIVA.....	17
4.9 PROPIEDADES MECÁNICAS EN ADITIVA.....	18
4.10 DEFORMACIÓN.....	18
4.11 ESFUERZOS TÉRMICOS.....	19
4.12 SIMULACIÓN MANUFACTURA ADITIVA.....	20
5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	23
5.1 VARIABLES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA	23
5.1.1 Simulación de Porosidad.....	24
5.1.2 Esfuerzos térmicos.....	24
5.1.3 Parámetros de la máquina para una simulación de esfuerzo térmico. 24	
5.1.3.1 Patrón de escaneo.....	24
5.1.3.2 Coeficiente de tensión anisotrópica.	24
5.1.4 Parámetros de la máquina para una simulación de patrón de escaneo. 25	
5.1.5 Deformación asumida o residual.....	25
5.1.6 Configurar una simulación de deformación asumida.....	25
5.1.6.1 Número de núcleos.....	26

5.1.6.2	Tamaño de vóxel (mm).	26
5.1.6.3	Frecuencia de muestreo de vóxeles.	26
5.1.7	Uso de soportes automáticos.	26
5.1.8	Parámetros de soporte sólido.	26
5.1.8.1	Ángulo de voladizo mínimo.	27
5.1.8.2	Espesor de pared mínimo y máximo (μm).	27
5.1.8.3	Potencia láser (W).	27
5.1.8.4	Velocidad de escaneo (mm/s).	27
5.1.8.5	Diámetro del rayo láser (μm).	27
5.1.8.6	Ángulo de capa inicial.	27
5.1.8.7	Ángulo de rotación de capa.	27
5.1.8.8	Espesor de capa (μm).	28
5.1.8.9	Espaciado entre cordones (μm).	28
5.1.8.10	Temperatura de la placa base ($^{\circ}\text{C}$).	28
5.1.9	Otros parámetros.	28
5.2	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EXPERIMENTALES.	29
5.2.1	Fabricación de probetas.	29
5.2.1.1	Descripción de la máquina.	29
5.2.1.2	Material.	30
5.2.1.3	Parámetros de fabricación.	31
5.2.2	Ensayo de tensión experimental.	37
5.2.2.1	Corte.	37
5.2.2.2	Medidas de las probetas.	40
5.2.2.3	Ensayo de tensión.	41
5.3	SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA	43
5.3.1	Características del ordenador.	43
5.3.2	Simulación de ensayo de tensión.	43
5.3.3	Simulación de procesos AM en Ansys Workbench.	57
5.3.3.1	Asistente aditivo.	59
5.3.3.2	Simulación con soporte predeterminado.	61
5.3.3.3	Simulación con soporte generado.	63
5.3.4	Simulación en ANSYS Additive	65

5.3.4.1	Simulación de una probeta.	66
6.	RESULTADOS	68
6.1	VARIABLES MÁS IMPORTANTES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA	68
6.2	DATOS EXPERIMENTALES	68
6.2.1	Ensayo de tensión.....	68
6.2.1.1	Probeta 1.	68
6.2.1.2	Probeta 2.	70
6.2.1.3	Probeta 3.	73
6.2.1.4	Probeta 4.	74
6.2.1.5	Probeta 5.	76
6.2.1.6	Probeta 12.	78
6.2.1.7	Propiedades mecánicas	81
6.3	DATOS DE SIMULACIÓN	86
6.3.1	Simulación ensayo de tensión.....	86
6.3.1.1	Probeta 1.	86
6.3.1.2	Probeta 2.	88
6.3.1.3	Probeta 3.	90
6.3.1.4	Probeta 4.	92
6.3.1.5	Probeta 5.	94
6.3.1.6	Probeta 12.	96
6.3.2	Simulación fabricación aditiva.	97
6.3.2.1	Con soporte predeterminado.	97
6.3.2.2	Con soporte automático.....	101
6.3.2.3	Deformación por soporte.	105
6.3.1	Simulación Ansys Additive.	107
6.3.1.1	Probeta 2.	107
6.3.1.2	Probeta 3.	108
6.3.1.3	Probeta 5.	109
6.4	VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	110
6.4.1	Probeta 1.....	110
6.4.2	Probeta 2.....	111
6.4.3	Probeta 3.....	112

6.4.4	Probeta 4.....	113
6.4.5	Probeta 5.....	114
6.4.6	Probeta 12.....	115
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	117
7.1	LAS VARIABLES IMPORTANTES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA	117
7.2	DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS POR ENSAYO EXPERIMENTAL DE TENSIÓN	117
7.3	SIMULACIÓN DE ENSAYO DE TENSIÓN.....	118
7.4	VALIDACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN Y EL ENSAYO A TENSIÓN	119
7.5	EFFECTO DEL ÁNGULO DE FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS PROBETAS	120
7.6	SIMULACIÓN DE FABRICACIÓN POR CAMA DE POLVO	120
7.7	SIMULACIÓN EN ANSYS ADDITIVE	121
8.	CONCLUSIONES.....	123
9.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	126
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
11.	ANEXOS.....	133
11.1	Anexo 1	133
11.2	Anexo 2	134
11.3	Anexo 3	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de la máquina.	2
Tabla 2. Composición química del 17-4PH.....	2
Tabla 3. Parámetros de fabricación.	3
Tabla 4. Probetas fabricadas.	3
Tabla 5. Medidas de las probetas.	4
Tabla 6. Área calculada de las probetas.	4
Tabla 7. Longitud calibra del ensayo experimental.	4
Tabla 8. Longitud calibrada en la simulación.	5
Tabla 9. Tiempo y desplazamiento de cada probeta en el ensayo experimental.	6
Tabla 1. Rango de parámetros.	28
Tabla 2. Especificaciones de la máquina.	30
Tabla 3. Composición química del 17-4PH.	30
Tabla 4. Parámetros de fabricación.	31
Tabla 5. Probetas fabricadas.	35
Tabla 6. Medidas de las probetas.	40
Tabla 7. Área calculada de las probetas.	41
Tabla 8. Longitud calibra del ensayo experimental.	41
Tabla 9. Longitud calibrada en la simulación.	44
Tabla 10. Tiempo y desplazamiento de cada probeta en el ensayo experimental.	52
Tabla 11. Parámetros de simulación.....	66
Tabla 12. Otros parámetros de simulación.	66
Tabla 13. Propiedades mecánicas para la probeta 1.	70
Tabla 14. Propiedades mecánicas para la probeta 2.	72
Tabla 15. Propiedades mecánicas para la probeta 3.	74
Tabla 16. Propiedades mecánicas para la probeta 4.	76
Tabla 17. Propiedades mecánicas para la probeta 5.	78
Tabla 18. Propiedades mecánicas para la probeta 12.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros del cuerpo de cada probeta. Fuente: elaboración propia.....	2
Figura 2. Movimiento del láser. Fuente: elaboración propia.	3
Figura 3. Medidas de las probetas a) de radio 4 mm, b) probeta radio 1 mm, c) probeta de radio 2,5 mm. Fuente: elaboración propia.....	3
Figura 4. Corte de probeta de 1 mm de espesor. Fuente: elaboración propia.	4
Figura 5. Ensayo de tensión de las probeta en la máquina. Fuente: elaboración propia.	5
Figura 6. Probeta simulada a) 1/8 de toda la probeta, b) ensamble. Fuente: elaboración. propia.....	5
Figura 24. Malla de la simulación. Fuente: elaboración propia.....	6
Figura 1. Máquina por cama de polvo.....	29
Figura 2. Parámetros del cuerpo de cada probeta.....	31
Figura 3. Movimiento del láser.....	32
Figura 4. Medidas de la probeta de radio 4 mm.....	32
Figura 5. Medidas de la probeta radio 1 mm.....	33
Figura 6. Medidas de la probeta de radio 2,5 mm.....	35
Figura 7. Máquina cortadora.....	37
Figura 8. Corte de las probetas a) empezando el corte, b) terminado el corte.	38
Figura 9. Diferentes probetas a) los cortes que se realizaron b) probeta de 1 mm de espesor.....	38
Figura 10. Probeta de radio 4 mm con espesor 1mm.....	39
Figura 11. Probeta de radio 2,5 mm con espesor 1mm.....	39
Figura 12. Probeta de radio 1 mm con espesor 1mm.....	40
Figura 13. Ensayo de tensión a) probeta en la máquina, b) posicionamiento correcto de las mordazas.....	42
Figura 14. 1/8 de probeta simulada.....	43
Figura 15. Nombre de las caras a) cara en YZ, b) cara en ZX, c) fuerza, d) cara en XY.....	44
Figura 16. Propiedades del material.....	45
Figura 17. Edge Sizing bordes horizontales.....	45
Figura 18. Edge Sizing borde horizontal del radio.....	46
Figura 19. Edge Sizing borde horizontal de arriba.....	47
Figura 20. Edge Sizing en los bordes verticales.....	48
Figura 21. Edge Sizing bordes horizontales del espesor.....	48
Figura 22. Face Sizing en la superficie del radio.....	49
Figura 23. Método de MultiZone.....	50
Figura 24. Malla de la simulación.....	50
Figura 25. Pasos para la creación del nodo.....	51
Figura 26. Pasos para la creación del sistema de coordenadas.....	52
Figura 27. Analysis Settings.....	53
Figura 28. Desplazamientos.....	54
Figura 29. Pasos del desplazamiento 4.....	55

Figura 30. Los resultados de la simulación a) fuerza y b) deformación.	56
Figura 31. Probeta simulada a) 1/8 de toda la probeta, b) ensamble.	56
Figura 32. Pasos para activar la extensión de AM.....	60
Figura 33. Probeta con soporte predeterminado.....	61
Figura 34. Creación de contactos a) contacto entre la probeta y el soporte, b) contacto entre el soporte y la base.	62
Figura 35. Malla con soporte predeterminado.	62
Figura 36. Probeta con soporte automático.	63
Figura 37. Creación de los contactos.....	64
Figura 38. Generación del soporte automático.	64
Figura 39. Iconos fundamentales.....	65
Figura 40. Resultado ensayo de tensión probeta 1.....	69
Figura 41. Resultado ensayo de tensión probeta 2.....	71
Figura 42. Resultado ensayo de tensión probeta 3.....	73
Figura 43. Resultado ensayo de tensión probeta 4.....	75
Figura 44. Resultado ensayo de tensión probeta 5.....	77
Figura 45. Resultado ensayo de tensión probeta 12.....	79
Figura 46. Simulación de tensión probeta 1.....	86
Figura 47. Simulación de tensión probeta 2.....	88
Figura 48. Simulación de tensión probeta 3.....	91
Figura 49. Simulación de tensión probeta 4.....	93
Figura 50. Simulación de tensión probeta 5.....	95
Figura 51. Simulación de tensión probeta 12.....	96
Figura 52. Temperatura con soporte predeterminado.....	98
Figura 53. Deformación total con soporte predeterminado.	98
Figura 54. Deformación elástica con soporte predeterminado.....	99
Figura 55. Esfuerzo von-Mises con soporte predeterminado.....	100
Figura 56. Temperatura con soporte automático.	102
Figura 57. Deformación total con soporte automático.....	102
Figura 58. Deformación elástica con soporte automático.	103
Figura 59. Esfuerzo de von-Mises con soporte automático.	104
Figura 60. Deformación probeta 2.	108
Figura 61. Deformación probeta 3.	109
Figura 62. Deformación probeta 5.	110
Figura 63. Gráfica del método offset.....	133

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Validación Esfuerzo - Deformación a) probeta 1 y b) probeta 4.....	7
Gráfica 2. Validación Esfuerzo - Deformación a) probeta 2, b) probeta 3 y c) probeta 12. ..	8
Gráfica 3. Validación Esfuerzo - Deformación de la probeta 5.....	8
Gráfica 1. Esfuerzo - deformación para 1.	70
Gráfica 2. Esfuerzo - deformación para 2.	72
Gráfica 3. Esfuerzo - deformación para 3.	74
Gráfica 4. Esfuerzo - deformación para 4.	76
Gráfica 5. Esfuerzo - deformación para 5.	78
Gráfica 6. Esfuerzo - deformación para 12.	80
Gráfica 7. Esfuerzo último.....	81
Gráfica 8. Yield Strength.....	82
Gráfica 9. Módulo de elasticidad.....	82
Gráfica 10. Esfuerzo último para 0°.	83
Gráfica 11. Yield strength para 0°.	83
Gráfica 12. Módulo de elasticidad para 0°.	84
Gráfica 13. Esfuerzo último para 45°.	85
Gráfica 14. Yield strength para 45°.	85
Gráfica 15. Módulo de elasticidad para 45°.	86
Gráfica 16. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 1.....	87
Gráfica 17. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 2.....	90
Gráfica 18. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 3.....	92
Gráfica 19. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 4.....	94
Gráfica 20. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 5.....	95
Gráfica 21. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 12.....	97
Gráfica 22. Deformación de las probetas espesor 12 mm.	100
Gráfica 23. Deformación de las probetas espesor 1 mm.	101
Gráfica 24. Deformación de las probetas espesor 1 mm.	104
Gráfica 25. Deformación de las probetas espesor 12 mm.	105
Gráfica 26. Comparación de la deformación con los dos tipos de soportes para espesor 1 mm.	106
Gráfica 27. Comparación de la deformación con los dos tipos de soportes para espesor 12 mm.	107
Gráfica 28. Validación de la probeta 1.	111
Gráfica 29. Validación de la probeta 2.	112
Gráfica 30. Validación de la probeta 3.	113
Gráfica 31. Validación de la probeta 4.	114
Gráfica 32. Validación de la probeta 5.	115
Gráfica 33. Validación de la probeta 12.	116

GLOSARIO

Manufactura aditiva: Es una tecnología nueva, que consiste en la fabricación de piezas, geometrías complejas, partiendo de un modelo CAD 3D, la fabricación es capa a capa.

Porosidad: Defectos generados por atrapamiento de gas durante el proceso de fabricación.

Distorsión: es la deformación de la forma en la pieza.

Anisotrópico: los materiales anisotrópicos tienen propiedades mecánicas diferentes en los tres ejes coordenados; es decir, que varían respecto al eje.

Ortótropo: es un material donde sus propiedades mecánicas, son diferentes en cada uno de los diferentes ejes.

Morfología: es la estructura que posee todo los materiales y es diferente para cada uno.

Rugosidad: cuando un material no es completamente liso, por lo general tiende a tener ondulaciones en la superficie.

Vóxel: el voxel es el tamaño de tetraedros que contiene la malla en una simulación por elementos finitos.

SÍMBOLOS

SSF: factor de escala de tensión

σ : Esfuerzo.

F : Fuerza.

A_o : Área transversal de la probeta.

ε : Deformación.

ΔL : Diferencia de longitud.

l_o : Longitud calibrada.

Lo: Longitud calibrada en la simulación.

E: Módulo elástico.

RESUMEN EXTENDIDO

VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS POR ENSAYO DE TENSIÓN DEL ACERO 17-4 PH

Vargas María^a, Felix Christian^b, Luz Hernández^c

^{a,c}Pamplona University, Km 1 Via B/manga, Pamplona, Colombia

^bengineering and industrial development center (CIDESI), Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta 702-No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro., México

Resumen

En el siguiente artículo se realizó una validación de la parte experimental y simulación de las propiedades mecánicas como es el módulo de elasticidad, límite de elasticidad y esfuerzo último del acero inoxidable 17-4 endurecido por precipitado; esta investigación se hizo con el fin de comprobar, si las simulaciones se pueden aplicar a la manufactura aditiva de metales, con el fin de disminuir tiempo y costos de la técnica fusión por cama de polvos. Primero se fabricaron seis probetas variando el espesor y el ángulo de fabricación, para posteriormente realizar ensayos de tensión, obteniendo el modulo y límite de elasticidad; luego, de realizado los ensayos experimentales se procedió a hacer las simulaciones lo más reales posibles, para comparar la gráfica de esfuerzo – deformación obtenida por ambos procesos. Se obtuvo como resultado que solo un ensayo tuvo la pendiente del módulo semejante en la validación, pero las demás no; por lo tanto, se deben realizar otras investigaciones para comprobar si el modelo empleado cumple para simulaciones de manufactura aditiva.

Palabras clave: Manufactura Aditiva; Ensayo De Tensión; Simulación.

Abstract

In the following article, a validation of the experimental part and simulation of the mechanical properties such as the modulus of elasticity, elastic limit and ultimate stress of 17-4 stainless steel hardened by precipitation was carried out; This investigation was carried out in order to verify if the simulations can be applied to the additive manufacturing of metals, in order to reduce time and costs of the powder bed fusion technique. First, six test tubes were manufactured, varying the thickness and manufacturing angle, to later carry out tensile tests, obtaining the modulus and limit of elasticity; then, after carrying out the experimental tests, the simulations were made as realistic as possible, in order to compare the stress-strain graph obtained by both processes. It was obtained as a result that only one trial had the slope of the similar module in the validation, but the others did not; therefore, other investigations should be carried out to verify if the model used is compliant for additive manufacturing simulations.

Keywords: Additive Manufacturing; tension test; Simulation.

1. Introducción

La fabricación en la actualidad, ha tenido que confrontar las cambiantes necesidades de las personas, buscando un enfoque centrado en el cliente. Las nuevas tecnologías de fabricación pueden suplir este problema; sin embargo, la implementación de ellas es costosa porque requiere de varios cambios y de altos recursos computacionales, pero no significa que no se puedan llegar a implementar. La utilización de las tecnologías digitales contribuye a la solución de procesos avanzados y producción continua en la industria, permitiendo un control coordinado para la reducción de fallas, pérdida de tiempo y mejora de la calidad del producto [1].

Desde 1960 se ha estudiado la Tecnologías de Fabricación Avanzada (AMT), pasando de los circuitos y sistemas digitales, a controladores lógicos programables (PLC) y a las máquinas herramientas por control numérico computarizado (CNC), este fue el punto de partida para la tercera revolución industrial. Antes de 1960, la AMT desarrollo he implemento la automatización en talleres artesanales, convirtiéndolos en líneas automáticas de producción; ayudando así a las empresas a producir en masa a bajo costo. Como resultado la AMT se utilizan en las empresas para mejorar la competitividad [2]. Por ejemplo, Alemania es la más competitiva en todo el mundo en la industria manufacturera, debido a su importante fabricación de máquinas, teniendo la ventaja de ser líder en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, siguiendo un enfoque estructurado para aprovechar los beneficios de la AMT.

Por lo tanto, la Manufactura Aditiva (AM) es una alternativa de fabricación versátil e innovadora, con experiencia en todos los niveles. Sin embargo, algunos problemas asociados a esta tecnología, son: el alto costo de implementar el proceso, los pocos materiales disponibles y lo más importante, la gran demanda de recursos para estudiar y optimizar los parámetros del proceso [3].

Para Cardeal et al, este proceso es muy prometedor en términos de mantenimiento, ya que apuestan por el almacenamiento digital de piezas, lo que significa menos almacenes para repuestos, menos tiempo de espera por ellos y menos tiempo

de inactividad de la máquina que significan costos para la empresa [4].

La fabricación aditiva basada en láser (LAM) en la actualidad, está avanzando rápidamente y ha tenido buena acogida en las industrias como la biomédica y la aeroespacial, pero la repetitividad y la calidad de las piezas fabricadas, hacen este proceso difícil de difundir. La LAM fabrica piezas capa a capa a partir de un diseño asistido por computadora (CAD), utilizando un láser para fundir el material y generar un charco líquido para producir la capa [5].

La fusión por cama de polvo (LPBF), también conocida comúnmente como fusión selectiva por láser (SLM), es uno de los procesos de la AM, que utiliza un rayo láser enfocado para fusionar selectivamente una cama de polvo metálico, para construir con componente tridimensional capa por capa. Este proceso crea piezas altamente complejas, con diferentes formas y propiedades mecánicas mejores a comparación con la técnica de forjado. Por lo tanto, se ha convertido en el proceso preferido para la fabricación de moldes con canales de enfriamiento, que antes eran difíciles de fabricar por procesos convencionales [6].

El material que se utilizó en la investigación fue el 17-4PH, que es un acero inoxidable endurecido por precipitado, tiene buena resistencia mecánica, excelente resistencia a la corrosión, maquinabilidad y tenacidad, debido al endurecido por precipitado producto de una matriz martensítica, se utiliza para aplicaciones de la industria química, eléctrica, marítima y aeroespacial por su máxima temperatura de servicio de 315°C.

Sin embargo, en el 17-4PH fabricado aditivamente, el comportamiento es diferente en la recristalización y precipitación por la microestructura anisotrópica; por lo tanto, la homogeneización de la microestructura y la precipitación son fundamentales, para obtener buenas propiedades mecánicas por fabricación aditiva del 17-4PH [7].

Por otro lado, los modelos numéricos son importantes para simular el comportamiento de la temperatura en el baño de fusión; así poder predecir la deformación, tensión residual y la microestructura [5].

De este modo, la simulación del proceso de AM desempeñará un papel importante en el diseño de piezas fabricadas de forma aditiva y es clave para la transición de una mera experiencia a un método de diseño apoyado en el conocimiento basado en simulación, que explota al máximo el gran potencial de esta técnica de fabricación [8].

Por lo tanto, se quiere demostrar las posibilidades que ofrece la simulación asistida por computador, en cuanto a mejorar eficientemente el proceso de la AM, disminuyendo tiempo, los costos y el consumo de material en el proceso de fabricación de piezas con la ayuda de ANSYS.

2. Experimental

2.1 Fabricación De Probetas

En esta sección se describe, como se fabricaron las probetas, desde la máquina, el material y los parámetros que se utilizaron en la fabricación.

2.1.1 Descripción de la máquina

Para la fabricación de las probetas, se utilizó la máquina M2 Cusing Multiláser de la marca CONCEPTLASER, del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) de Querétaro, México. Las especificaciones de la máquina se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de la máquina.

Dimensiones de construcción (mm) (x, y, z):	250 x 250 x 280
Espesor de la capa	20 – 80
Velocidad de producción (cm³/h) (dependiendo del material/ potencia del láser):	2 – 35
Láser (W):	2 x 200
Velocidad de escaneo (m/s):	Máx. 4,5
Diámetro del láser (µm):	50 – 500
Condiciones de operación	15 – 35
Materia placa base	Acero inoxidable 316
Dimensiones placa base (mm):	245 x 245
Temperatura precalentamiento	No hubo
Temperatura ambiente (°C):	23 – 25
Tipo de gas	Gas argón

2.1.2 Material

Tanto las propiedades mecánicas como los defectos que se generan en las piezas fabricadas

aditivamente dependen en gran medida de la composición química del material; cabe resaltar que la composición química del material varía dependiendo del proveedor. El proveedor del polvo de acero inoxidable endurecido por precipitación (17-4PH) es CONCEPTLASER es una empresa de aditivos GE; el cual, presenta una composición química mostrada en la siguiente Tabla 12.

Tabla 2. Composición química del 17-4PH.

Componente	Valor indicativo (Peso en %)
C	0 – 0,07
Mn	0 – 1
P	0 – 0,04
S	0 – 0,03
Si	0 – 1
Cr	15 – 17,5
Ni	3 – 5
Cu	3 – 5
Nb + Ta	0,15 – 0,45
Fe	Balanceado

Fuente: [9]

2.1.3 Parámetros de fabricación

Se fabricaron probetas por la técnica de fusión por cama de polvo variando diferentes parámetros pero los más importantes son los del interior de la probeta, donde la potencia del láser fue de 370 W, la velocidad del láser fue de 800 mm/s, el espaciado de trazos fue de 0,12 mm, el diámetro del láser fue de 135 µm, en la Figura 9 se pueden observar los diferentes parámetros que componen la probeta.

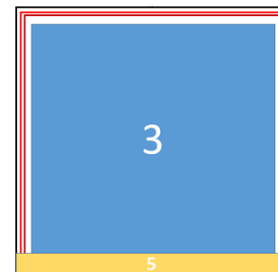


Figura 1. Parámetros del cuerpo de cada probeta. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 13 se observa más a detalle los diferentes parámetros utilizados en la fabricación, el parámetro 5 se utilizó para la base de la probeta,

el 3 es el más importante porque fue utilizado para la fabricación del cuerpo o interior y los otros tres parámetros son superficiales.

Tabla 3. Parámetros de fabricación.

# parámetro	Potencia (W)	Velocidad de escaneo (mm/s)	Distancia entre trazos [mm]	Diámetro del láser [μm]
5	200	1100	0,085	135
3	370	800	0,12	135
Vino tinto	100	950		50
Rojo	200	1100	0,085	135
Negro	100	350		50

Además, el ángulo de fabricación de las probetas para 1, 2 y 4 fue de 0° y para 3, 5 y 12 el ángulo de fabricación fue de 45° , en la Figura 10 a continuación se puede observar, como es el movimiento del láser para cada ángulo respectivamente.

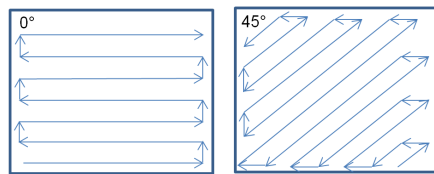


Figura 2. Movimiento del láser. Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones de las probetas se observan en los planos, las fabricaciones de las seis probetas tiene tres geometrías diferentes; es decir, que la 2 y 3 comparten la misma geometría de 4 mm de ancho y radio de 4 mm (Figura 11a), la 5 y la 1 tiene ancho 10 mm y radio 1 mm (Figura 11b) y por último la 4 y la 12 son de ancho 7 mm y radio 2,5 mm (Figura 11c), se siguió la norma E8 para probetas para ensayo de tensión.

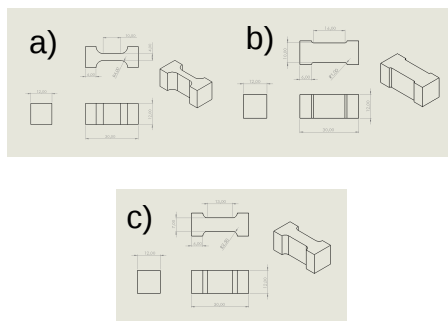


Figura 3. Medidas de las probetas a) de radio 4 mm, b) probeta radio 1 mm, c) probeta de radio 2,5 mm. Fuente: elaboración propia.

Después de la fabricación se obtuvieron seis piezas como se muestra en la siguiente Tabla 14.

Tabla 4. Probetas fabricadas.

Probeta # 1



Probeta # 2



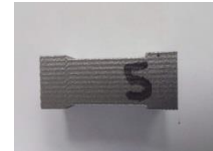
Probeta # 3



Probeta # 4



Probeta # 5



Probeta # 12



2.2 Ensayo De Tensión Experimental

En esta sección se explica el paso a paso de la preparación de las probetas para los ensayos de tensión, se puede observar el corte y las medias de las probetas.

2.2.1 Corte

Para realizar los ensayos de tensión, primero se cortaron las probetas fabricadas por cama de

polvo para tener varias rodajas de 1 mm de espesor aproximadamente, el disco que se utilizó para los cortes de las seis probetas, fue un disco de diamante de 12 x 0,4 x 12,7 mm de la marca Struers, en una cortadora Accutom-100 con una velocidad de 0,015 mm/s a 2500 rpm. El corte de las probetas fue con el disco de diamante, donde por cada pieza se demoró aproximadamente 30 min, para cortarla en su totalidad.

Al final se obtuvieron dos rodajas por cada probeta, como se ve en la Figura 16; el cual, solo se utilizó la segunda rodaja que es la lisa para el ensayo de tensión.



Figura 4. Corte de probeta de 1 mm de espesor. Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Medidas de las probetas

Luego de cortar las probetas, se midieron manualmente tres veces el ancho y el espesor con un calibrador digital, para sacar un promedio y se registraron en la Tabla 15.

Tabla 5. Medidas de las probetas.

Medidas Probeta								
	Ancho (mm)				Espesor (mm)			
	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.
2	4,21	4,14	4,15	4,167	1,56	1,55	1,56	1,557
3	4,17	4,14	4,17	4,160	1,03	0,99	0,98	1,000
4	7,24	7,15	7,15	7,180	1,55	1,52	1,5	1,523
5	10,07	10,13	10,09	10,097	1,77	1,77	1,77	1,770
12	7,16	7,25	7,28	7,230	1,14	1,06	1,01	1,070
n/a	10,11	10,08	10,1	10,097	1,41	1,4	1,41	1,407

Además, se obtuvo el área con el promedio del Ancho * promedio del Espesor de cada probeta como se observa en la Tabla 16.

Tabla 6. Área calculada de las probetas.

Área

2	6,486	mm ²
3	4,160	mm ²
4	10,938	mm ²
5	17,871	mm ²
12	7,736	mm ²
n/a	14,203	mm ²

La longitud calibrada para los ensayos experimentales de tensión para cada probeta se muestra a continuación en la Tabla 17, estas medidas se utilizan para calcular la deformación de cada una.

Tabla 7. Longitud calibra del ensayo experimental.

muestra 2	lo	15,35	mm
muestra 3	lo	13,61	mm
muestra 4	lo	13,66	mm
muestra 5	lo	13,34	mm
muestra 12	lo	14,38	mm
muestra n/a	lo	12,78	mm

2.2.3 Ensayo de tensión

En el ensayo de tensión experimental, primero se buscó la mitad a cada probeta, para que quedaran centradas en las mordazas, luego se montó la pieza en la máquina universal con ambiente controlado observado en la Figura 20 y procedió a realizar el ensayo aplicando carga hasta que se fracturo la probeta, esto se hizo con cada una; cabe aclarar, que solo realizo un ensayo de tensión por cada probeta, por el costo que tiene todo el proceso, desde la fabricación hasta los ensayos se realizaron en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial de Querétaro, México.



Figura 5. Ensayo de tensión de las probeta en la máquina.
Fuente: elaboración propia.

Para graficar los datos que dieron en el ensayo experimental de tensión, primero se debe sacar el esfuerzo con la siguiente ecuación 2.

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (2)$$

Donde,

σ es el esfuerzo.

F es la fuerza.

A_o es el área transversal de la probeta.

Y la deformación es como se observa en la ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_o} \quad (3)$$

Donde,

ε es la deformación.

ΔL es la diferencia de longitud.

l_o es la longitud calibrada.

El método de compensación (offset), se utiliza para determinar el límite elástico (yield strength), este método offset = 0,2%; es decir, se debe sacar una paralela de la pendiente al 0,2% según norma ASTM E8 como se ve en la Figura 70 de Anexo 1 y para obtener el módulo elástico se utilizó el método de la secante.

2.3 Simulación De Manufactura Aditiva

La AM tiene varias técnicas de fabricación de piezas metálicas, pero el software ANSYS solo se enfoca en la fusión por cama de polvo y la deposición de energía dirigida; los cuales, puede producir productos sin porosidad; es decir, totalmente densos. Pero como estos procesos utilizan altas temperaturas para fundir el metal, se generan diferentes problemas como distorsiones y tensiones durante la fabricación de la pieza.

La simulación para la manufactura aditiva, será capa de ayudar a prevenir los fallos y mejorar los diseños antes de la fabricación de componentes metálicos; además, de determinar cuál es la mejor

orientación de construcción de una pieza y su soporte.

2.3.1 Características del ordenador

Se necesita un ordenador de alta capacidad y procesador, puede ser desde un Intel i5 en adelante, con disco sólido mayor a 8 Gb de RAM (se recomienda que sea de 16 Gb) de última generación. La computadora utilizada para las simulaciones fue un Intel Xeon W-2145 con RAM de 64 GB y 8 núcleos.

2.3.2 Simulación de ensayo de tensión

Para simular los ensayos de tensión de las probetas, se utilizó el Workbench de Ansys en el módulo de Static Structural por el método de elementos finitos; primero se construyó 1/8 de probeta (Figura 21); es decir, se creó sola la mitad del largo y espesor de la probeta, porque con esto se puede trabajar con simetría, para obtener una mejor malla y resultados más exactos.

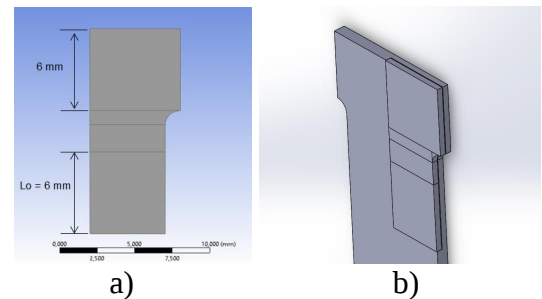


Figura 6. Probeta simulada a) 1/8 de toda la probeta, b) ensamble. Fuente: elaboración. propia.

Las líneas que se observan en la Figura 21, son para refinar la malla y en especial “Lo” que es la longitud calibrada (Tabla 18), es donde se midió la deformación de la probeta.

Tabla 8. Longitud calibrada en la simulación.

Probeta	Lo
2	4 mm
3	4 mm
4	6 mm
5	6 mm
12	6 mm
1	6 mm

Luego de la creación del 1/8 de probeta, se le dio nombre a las caras de la simetría y donde va la fuerza. Después se pasó a la librería de Ansys y se creó un nuevo material, para las diferentes probetas se introdujo las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tensión experimental, como es el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción.

Lo siguiente es realizar la malla, el parámetro empleado en este fue al ancho de la probeta por el número de divisiones que fue de 20. Se realizó un Edge sizing en cada uno de los bordes para que quedara bien definida y refinada, el primer sizing se le aplico a los 8 bordes horizontales, y el tipo de malla fue por número de divisiones que fueron 20 para todas las probetas.

El segundo Edge sizing fue aplicado en los dos bordes horizontales del arco de la probeta, el tipo de malla fue por tamaño del elemento, el cual fue de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm.

El tercer Edge sizing es el de los dos bordes superiores horizontales, con un tamaño de elemento de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4 mm fue de 0,1 mm.

El cuarto Edge sizing se empleó en todos los bordes verticales, los cuales fueron 16 en total, con un tamaño de elemento igual que los anteriores de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm. En el quinto Edge sizing se aplicó a los 10 bordes horizontales del espesor, con un número de divisiones de 4 para todas las probetas.

El Face sizing se realizó en la parte del radio de la probeta, con un tamaño de elemento de 0,25 mm, para las probetas de radio 1 mm, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm. Por último, en las condiciones de la malla, se realizó un método de tipo Multizona en todo el cuerpo, con malla tipo Hexa, seleccionando las ocho caras de forma manual; es decir, se seleccionaron todas, menos el triángulo del radio. Como resultado se tuvo una malla

triangular con el máximo refinamiento como se puede ver en la Figura 31.

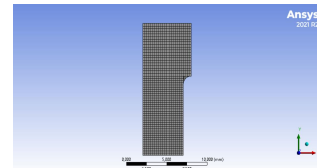


Figura 7. Malla de la simulación. Fuente: elaboración propia.

Luego de realizar el mallado en 1/8 de probeta, se pasó a especificar el nodo, donde se calculó la deformación; en la parte Named Selections se crea uno nuevo llamado “NODEY”, donde se declara que el método sea Worksheet; el cual va a estar en la distancia calibrada (Lo) de altura y en la mitad del ancho, para que no cambien el área al aplicar el desplazamiento. Luego de esto, se creo un sistema de coordenadas en el nodo específico; el cual, se nombro “CS_NY”; es decir, al crear un nuevo sistema de cordenadas se especifico que el origen fuera en el Named Selecton “NODEY”.

Luego del nuevo sistema de coordenadas, se pasó al parámetro de Static Structural, primero en Analysis Settings se colocó el tiempo que duro el ensayo de tensión experimental, que varía en cada probeta como se muestra en la Tabla 19; además, debe estar activado el parámetro “Large Deflection” para que la simulación sea exitosa.

Tabla 9. Tiempo y desplazamiento de cada probeta en el ensayo experimental.

Probeta	Tiempo	Desplazamiento Máximo
# 2	195	3,256325
# 3	150	2,502767
# 4	267	4,454975
# 5	354	5,898592
# 12	206	3,434042
# 1	287	4,793475

Se fijaron cuatro desplazamientos, de los cuales 3 son para fijar las caras de la simetría así: el primer desplazamiento tiene cero movimiento Z y libre el eje X y Y, el segundo desplazamiento tiene cero movimiento en X y libre en Y y Z, el tercer desplazamiento tiene cero movimiento en Y y es libre en X y Z.

El último desplazamiento aplicado es el de la fuerza, donde se debe seleccionar el nombre de la fuerza y no la cara para una mejor simulación,

luego como el desplazamiento se efectúa en la coordenada Y, a esta se le da en tabular datos. Finalmente, saldrá una tabla con el tiempo ajustado anteriormente, en la cual, la última casilla para el tiempo tiene la mitad del valor máximo de desplazamiento de cada probeta, se coloca solo la mitad, ya que solo se está simulando la mitad de la probeta.

Por último, en resultados se llama la variable Force Reaction aplicada en el desplazamiento 4 y la Deformation Probe aplicada en el sistema de coordenadas llamado CS_NY. Para calcular el esfuerzo simulado este es cuatro veces la fuerza simulada sobre el área transversal experimental de la probeta.

Entonces, las fuerzas deben ser multiplicadas por cuatro, como se observa en la siguiente ecuación 4.

$$\sigma = \frac{4F_s}{A_o} \quad (4)$$

Donde,

F_s es la fuerza en la simulación.

Y la deformación es dos veces la diferencia de longitud dividida por la longitud calibrada de la simulación, porque solo se está simulando la mitad, como se muestra en la ecuación 5.

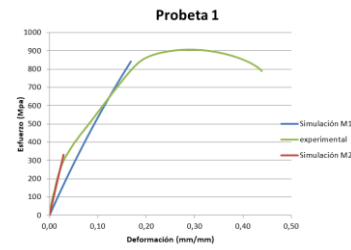
$$\varepsilon = \frac{2\Delta L}{L_o} \quad (5)$$

Donde,

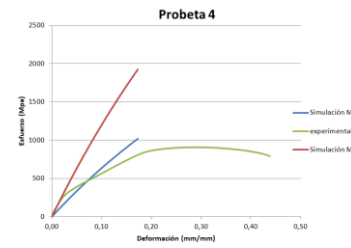
L_o es la longitud calibrada en la simulación.

3. Resultados

En la Gráfica 1 se puede observar la gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 1 y 4; donde, los datos experimentales de tensión corresponden a la línea de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad la representación se hace en azul.



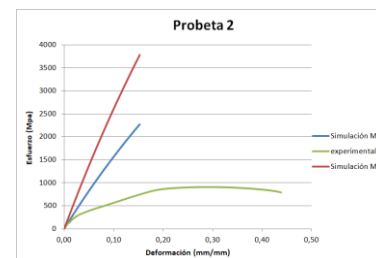
a)



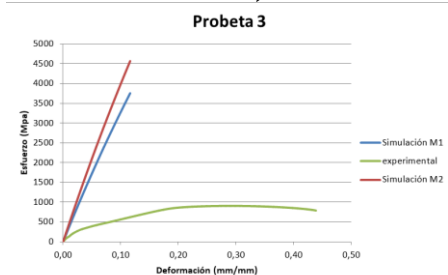
b)

Gráfica 1. Validación Esfuerzo - Deformación a) probeta 1 y b) probeta 4.

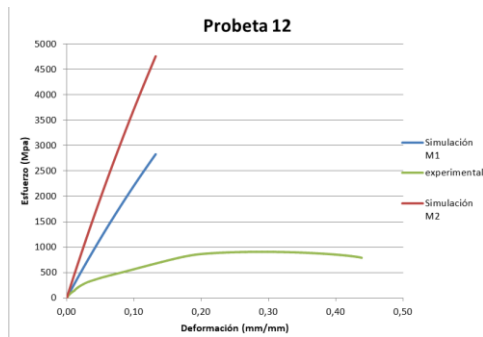
La gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 2, 3 y 12; donde, los datos experimentales de tensión son representados con la línea de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul como se muestra en la Gráfica 2.



a)



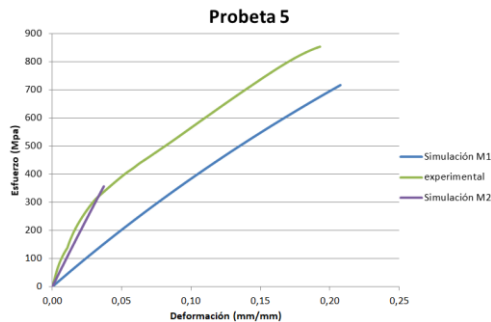
b)



c)

Gráfica 2. Validación Esfuerzo - Deformación a) probeta 2, b) probeta 3 y c) probeta 12.

En la Gráfica 3 se puede observar la gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 5; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se gráfica en color morado y para el primer módulo de elasticidad en azul.



Gráfica 3. Validación Esfuerzo - Deformación de la probeta 5.

4. Discusión

Como se pudo observar en los resultados al validar los ensayos experimentales con las simulaciones se obtuvo que todas las probetas tienen un comportamiento diferente con el mismo modelo de simulación. Esto puede deberse a que las simulaciones se hicieron de forma que el material se comporta como sólido, ya que las simulaciones con formato .stl que simula un comportamiento capa a capa de la pieza, no se pudieron realizar.

También se debe a que las probetas se fabricaron con ángulos diferentes; es decir, que el modelo que se planeó para las simulaciones de los ensayos a tensión no se adapta a cualquier ángulo de fabricación de las piezas. Además, las gráficas

esfuerzo – deformación experimentales tienen dos pendientes diferentes en la zona elástica; es decir, que tienen dos módulos diferentes, como si se tuviera un comportamiento de dos materiales en uno; lo que dificultó la exactitud de las simulaciones.

Para la probeta 1 y 4, las simulaciones tienden a ser parecidas con la experimental solo en la primera pendiente; es decir, cuando se emplea el segundo módulo de la primera pendiente de la gráfica experimental; mientras que para la segunda pendiente que emplea el módulo uno, no corresponde a la simulada con la experimental. La probeta 2, 3 y 12 no son coherentes en la tendencia de las simulaciones con la experimental; por otro lado, la simulación de la probeta 5, si es coherente con la experimental como se puede observar en la Gráfica 3.

El límite elástico y el módulo de elasticidad de la primera pendiente en la simulación, se acerca bastante a la experimental y para la segunda pendiente el módulo de elasticidad tienen la misma pendiente pero el límite de elasticidad no coincide. Esto se debe a las condiciones de fabricación de la probeta 5, los cuales son: el espesor y el ángulo de fabricación; al tener las propiedades mecánicas más altas, las simulaciones son más exactas.

5. Conclusiones

Las propiedades mecánicas obtenida de los ensayos experimentales de tensión no fueron las mejores, ya que la composición química y el ángulo de fabricación de las probetas son las que más afecta en el proceso y por lo tanto, para las probetas fueron muy bajas el esfuerzo último, el límite y el módulo de elasticidad. Las gráficas de esfuerzo – deformación experimental tienen un comportamiento inusual en la zona elástica, esto se debe a la transformación martensítica de acero inoxidable, causada por la aplicación de esfuerzos en el ensayo de tensión; generando un aumento del módulo y límite elástico del material.

En el primer acercamiento de las simulaciones para la manufactura aditiva de metales, fue con la ayuda del Workbench de Ansys; donde, se

realizaron simulaciones de ensayos de tensión por el método de elementos finitos y como parámetro de entrada, el módulo y el límite de elasticidad obtenidos en los ensayos experimentales. De las simulaciones de ensayo de tensión se obtuvo, que se debe sacar muy bien las propiedades mecánicas para que las simulaciones sean más reales y tiendan a parecerse con los ensayos experimentales.

También se demostró que solo se pueden realizar simulaciones con cuerpo sólidos, ya que al utilizar formatos que simulen el comportamiento capa a capa de la pieza, la capacidad de los computadores no es suficiente; pero como es un análisis de elementos finitos, el comportamiento de las propiedades mecánicas utilizados como entrada serán en cada nodo del cuerpo. En conclusión, la validación de la simulación con la experimental de los ensayos a tensión de las probetas, el modelo empleado solo se ajusta al módulo de elasticidad y no al límite elástico para la probeta número 5, que tiene el ángulo de fabricación de 45° y espesor de 10 mm. Por lo tanto, se debe realizar más pruebas experimentales con el ángulo de fabricación para mejorar el método de simulación.

6. Agradecimientos

Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y al consorcio de CONACYT de Manufactura Aditiva (CONMAD) por permitir los ensayos experimentales y a los docentes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona por todo el apoyo y conocimiento brindado.

7. Referencias

[1] D. Ntamo *et al.*, “Industry 4.0 in Action: Digitalisation of a Continuous Process Manufacturing for Formulated Products,” *Digit. Chem. Eng.*, vol. 3, no. February, p. 100025, 2022, doi:

10.1016/j.dche.2022.100025.
 [2] R. Pinto and G. Gonçalves, “Application of Artificial Immune Systems in Advanced Manufacturing,” *Array*, vol. 15, no. October 2021, p. 100238, 2022, doi: 10.1016/j.array.2022.100238.
 [3] J. De Ciurana, L. Serenó, and È. Vallès, “Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture,” *Procedia CIRP*, vol. 5, pp. 152–157, 2013, doi: 10.1016/J.PROCIR.2013.01.031.
 [4] G. Cardeal, D. Sequeira, J. Mendonça, M. Leite, and I. Ribeiro, “Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts,” *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 211–216, 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.01.032.
 [5] Z. Yan *et al.*, “Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 106, pp. 427–441, 2018, doi: 10.1016/j.optlastec.2018.04.034.
 [6] S. Sabooni *et al.*, “Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, no. June, p. 102176, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102176.
 [7] K. Li *et al.*, “Homogenization timing effect on microstructure and precipitation strengthening of 17–4PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion,” *Addit. Manuf.*, vol. 52, no. November 2021, p. 102672, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102672.
 [8] T. Mayer, G. Brändle, A. Schönenberger, and R. Eberlein, “Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts,” *Heliyon*, vol. 6, no. 5, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03987.
 [9] C. Composition, “Fe 55,847.”

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva (AM) más conocida como impresión 3D, es una tecnología en continuo desarrollo y se ha vuelto uno de los procesos de fabricación más importantes para la industria, debido a las ventajas que ofrece en la fabricación de piezas complejas, ahorro en material, tiempo y mejora de propiedades mecánicas. La AM es una alternativa de fabricación viable e innovadora; la cual, está creciendo cada día a pesar de algunos inconvenientes que se deben ir solucionando. Entre ellos, se tiene el alto costo de implementar el proceso, los pocos materiales disponibles y, lo más importante, la dificultad de estudiar los parámetros del proceso (De Ciurana et al., 2013). Por lo tanto, la AM de metal por fusión de cama de polvo (LPBF) fórmula parámetros de procesamiento óptimos, que incluyen la potencia del láser, el grosor de la capa, la velocidad de escaneo del láser, el patrón de escaneo, etc. Estas condiciones ayudan a generar materiales densos, reducen la rugosidad y los defectos para mejorar los resultados del material. La obtención de parámetros adecuados puede mejorar los problemas relacionados con la fabricación, como la microestructura, la tensión residual, etc. En lo referente a la distorsión, se genera cuando las tensiones residuales son más altas que el límite elástico del material, lo que produce problemas en la funcionalidad de la pieza como no cumplir las tolerancias requeridas o peor aún, un agrietamiento en el material (Oliveira et al., 2020).

En este trabajo, se desarrolló una metodología de simulación para la fabricación de piezas por el proceso LPBF; en la cual, se realizó un análisis de los parámetros y requerimientos que se necesitan para ejecutar las diferentes simulaciones, al variar los diferentes parámetros que se tienen, ensayos experimentales desde la fabricación de las probetas, ensayo de tensión y el análisis de los resultados de las simulaciones en comparación con los experimentales. Los resultados son una serie de parámetros y condiciones de fabricación para que la pieza final sea óptima antes de fabricarse. Con este estudio se demuestra las ventajas que ofrece la simulación asistida por computador en cuanto a mejorar eficientemente el proceso de LPBF en la AM, disminuyendo tiempo, costos y el consumo de material en el proceso de fabricación de piezas con la ayuda de ANSYS Additive y Workbench.

2. JUSTIFICACIÓN

El programa ANSYS Additive simula la construcción capa por capa de piezas metálicas a través del proceso LPBF, que es un tipo de fabricación aditiva; el cual, utiliza materiales en polvo para la fabricación de piezas complejas, utilizando un rayo láser para fundir el material. A medida que se procesa cada capa, el área debajo del láser experimenta un calor extremo localizado y se enfría rápidamente, lo que da como resultado una deformación térmica. Los métodos de simulación utilizan la acumulación de tensión específica capa por capa para predecir esta deformación. Se obtuvo información sobre los complejos fenómenos basados en la física asociados con este proceso. Se hizo este desarrollo para dar a conocer un nuevo método para el mejoramiento y optimización del proceso LPBF con la ayuda de la simulación. La contribución principal de esta investigación, es analizar un método de optimización para el proceso de LPBF que ha sido adicionado en los últimos dos años al programa ingeniería asistida por computador (CAE), para el mejoramiento y optimización de los procesos de AM de metales. Este análisis consistió en determinar mediante la simulación de ingeniería, los mejores parámetros en la fabricación de una probeta para ensayo a tensión de acero 17-4PH, para posteriormente, en la continuación de esta línea de investigación, realizar la fabricación y comparación con los resultados obtenidos. Se determinaron los mejores parámetros de fabricación con relación a la microestructura, deformación térmica y distorsión; con el desarrollo de este proyecto se obtuvo como resultado, simulaciones que permitan la reducción de costos y tiempo en el proceso de fabricación de piezas por LPBF, con el fin de beneficiar las futuras investigaciones en esta área, ya que son limitados los trabajos publicados relacionados con la simulación de AM para la técnica de LPBF.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Validar las propiedades mecánicas por medio de un ensayo de tensión del acero 17-4 PH fabricado por fusión de cama de polvo

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables más importantes de la simulación de manufactura aditiva en relación a la eficiencia y la aplicabilidad industrial
- Determinar experimentalmente el módulo de elasticidad, límite de elasticidad y esfuerzo último de una probeta manufacturada por LPBF
- Validar el módulo de elasticidad, límite de elasticidad y esfuerzo último obtenidos por simulación y el ensayo a tensión

4. ESTADO ACTUAL

Los procesos de manufactura en la actualidad, ha tenido que confrontar las cambiantes necesidades de las personas, buscando un enfoque centrado en el cliente. Las nuevas tecnologías de fabricación pueden suplir este problema; sin embargo, la implementación de ellas es costosa porque requiere de varios cambios y de altos recursos computacionales, pero no significa que no se puedan llegar a implementar.

La utilización de las tecnologías digitales contribuye a la solución de procesos avanzados y producción continua en la industria, permitiendo un control coordinado para la reducción de fallas, pérdida de tiempo y mejora de la calidad del producto (Ntamo et al., 2022).

La implementación de Tecnologías de Fabricación Avanzada (AMT) en los últimos años en la industria, ha mejorado la competitividad y el desarrollo sostenible de productos personalizados. La AMT llegó a la 4ª Revolución Industrial con la instauración de la inteligencia artificial, mejorando los sistemas industriales para que sean autónomos y rápidos (Pinto & Gonçalves, 2022).

En el siglo 21 las empresas se caracterizan por su alta competitividad, los consumidores cambian constantemente sus intereses, lo que produce cambios de demanda generando una corta vida útil de los productos; esto lleva a las empresas a la obligación de responder rápidamente a la demanda de consumo.

El problema de esto, es la implementación de nuevas tecnologías que sean flexibles y que se adapten rápidamente a la producción en masa para obtener diferentes productos en gran volumen. Desde la antigüedad, la industrialización ha jugado un papel importante en la humanidad para generar la innovación y desarrollo de ideas y productos; la implementación de nuevas tecnologías conducen a mejores ingresos a menor costo, llamada Revolución Industrial 4.0 (I4.0); la I4.0 conecta los objetos físicos entre sí, para comunicarse unos con otros (Pinto & Gonçalves, 2022).

La I4.0 está acaparando todos los sectores industriales; por ejemplo, la farmacéutica adopta la fabricación inteligente, para mejorar la sostenibilidad de las cadenas de suministros. El mercado actual en la industria farmacéutica, debe realizar una evaluación del ciclo de vida de los medicamentos, el efecto ambiental, recursos y energía. Con la I4.0 esto es posible gracias a la implementación de sistemas inteligentes, que son producto de investigaciones de ingeniería; también, la industria aeroespacial utiliza tecnología digital, para el mantenimiento predictivo de motores aeronáuticos (Ntamo et al., 2022).

Por la pandemia de COVID-19 se necesitaron nuevas tecnologías de fabricación, que fueran más flexibles en cuanto a la variación de la demanda en menor tiempo; por ejemplo, por el aislamiento producto de la pandemia, ocasiono la falta de operarios en las fábricas, esto dio como resultado la implementación de automatización para poder seguir las líneas de producción evitando retrasos (Ntamo et al., 2022).

La I4.0 tiene la ventaja de incorporar sistemas digitales en la línea de producción, obteniendo datos utilizados para toma de decisiones sobre la producción. El reto es transformar todos los sectores de la industria a formas digitales, lo que significa pasar de tecnologías tradicionales a tecnologías automatizadas y digitalizadas; si bien, esto implica altos costos de transición y además, también existe la poca experiencia y la falta de capacitación en el manejo de estas tecnologías (Ntamo et al., 2022).

Por otro lado, las AMT son muy útiles en la industria, pero difíciles de aceptar por las mismas, ya sea por falta de presupuesto para adquirirlas o porque no cumplen completamente la solución de la aplicación, ya que en realidad adoptarse a nuevas tecnologías es complejo. Es decir, para cada empresa e industria existen desafíos únicos, a los cuales se debe adaptar las nuevas tecnologías, lo que es difícil y costoso en los diferentes entornos (Pinto & Gonçalves, 2022).

4.1 FABRICACIÓN AVANZADA

Desde 1960 se ha estudiado la AMT, pasando de los circuitos y sistemas digitales, a controladores lógicos programables (PLC) y a las máquinas herramientas por control numérico computarizado (CNC), este fue el punto de partida para la tercera revolución industrial. Antes de 1960, la AMT desarrolló e implementó la automatización en talleres artesanales, convirtiéndolos en líneas automáticas de producción; ayudando así a las empresas a producir en masa a bajo costo. Como resultado la AMT se utilizan en las empresas para mejorar la competitividad (Pinto & Gonçalves, 2022).

Por ejemplo, Alemania es la más competitiva en todo el mundo en la industria manufacturera, debido a su importante fabricación de máquinas, teniendo la ventaja de ser líder en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, siguiendo un enfoque estructurado para aprovechar los beneficios de la AMT.

Por otro lado, el apoyo a la investigación del mundo online, abrió las puertas a la I4.0, permitiendo a centros de investigación y empresas el desarrollo de futuras tecnologías, integrando técnicas físicas y computacionales conectadas entre sí, a través del internet. Es decir, que las investigaciones en este entorno abarcan

diferentes disciplinas del conocimiento, debido a la amplitud de las nuevas tecnologías relacionadas a la I4.0 (Pinto & Gonçalves, 2022).

4.2 PROCESOS AVANZADOS DE MANUFACTURA

La fabricación aditiva basada en láser (LBAM) en la actualidad, está avanzando rápidamente y ha tenido buena acogida en las industrias como la biomédica y la aeroespacial, pero la repetitividad y la calidad de las piezas fabricadas, hacen este proceso difícil de difundir. La LBAM fabrica piezas capa a capa a partir de un diseño asistido por computadora (CAD), utilizando un láser para fundir el material y generar un charco líquido para producir la capa (Yan et al., 2018).

Las ventajas de este tipo de fabricación, es que puede mejorar las propiedades mecánicas controlando el tamaño de grano y que la zona afectada sea pequeña, genera tasas de enfriamiento altas, logrando granos más finos y por lo tanto, mejores propiedades mecánicas. Por otro lado, como el material se debe fusionar, es posible trabajar con materiales difíciles de mecanizar y refractarios; y lo más importante, se pueden procesar geometrías con alta complejidad (Yan et al., 2018).

La Manufactura Aditiva (AM) es una alternativa de fabricación versátil e innovadora, con experiencia en todos los niveles. Sin embargo, algunos problemas asociados a esta tecnología, son el alto costo de implementar el proceso, los pocos materiales disponibles y lo más importante, la gran demanda de recursos para estudiar y optimizar los parámetros del proceso (De Ciurana et al., 2013).

El crecimiento futuro sostenible de la AM, requiere que supere varias barreras; en particular, la formación de defectos y el alto costo de producción. Motivados por el creciente interés de reducir el costo de la materia prima.

Según las investigaciones de Wu et al., el polvo de Ti-6Al-4V, muestran que la porosidad parcial se puede controlar para producir componentes casi completamente densos (> 99,8% de densidad), optimizando los parámetros del proceso. El mapa de proceso que se desarrolló con el polvo HDH, ofrece una guía general para el uso de polvo no esférico en la cama de polvo AM. En este trabajo, investigaron el tamaño, la morfología y la distribución espacial de la porosidad inducida por el polvo en 3D (Z. Wu et al., 2021).

4.3 MANUFACTURA ADITIVA

La AM surgió como una alternativa prometedora a la manufactura tradicional en la última década; los procesos convencionales comprenden el corte y la eliminación de material hasta obtener un producto. A diferencia de la AM, que implica fusionar capa a capa el material en polvo hasta obtener la pieza deseada; este proceso tiene diferentes ventajas como fabricación de piezas complejas o muy pequeñas, buenas propiedades mecánicas, mejores condiciones de trabajo y la más importante, la producción rápida de componentes de varios materiales promoviendo la producción a gran escala.

Además, la habilidad de fabricar diferentes geometrías y complejidad con diferentes materiales, en una sola máquina es increíble. Sin embargo, existen nuevos desafíos para este tipo de fabricación, como lo son el desperdicio de material, exactitud en las dimensiones y generación de cavidades internas. Cuenta con algunas limitaciones como la poca precisión en las tolerancias, provocada por la alta potencia del láser necesaria para la fabricación (Korkmaz et al., 2022).

La AM en los últimos años es de gran interés, debido a la fabricación capa por capa de piezas complejas y el ahorro de material en la fabricación de dichas piezas; por otro lado, el láser con el que se fabrican las piezas, genera altas temperaturas en cada capa, lo que provoca contracciones y dilataciones localizadas, produciendo deformaciones en la pieza.

Para solucionar el problema de la deformación en toda la pieza, se emplea una adición de material para generar una estructura de soporte, que consiste en conectar la pieza con la cama base; el problema de los soportes, es que se deben retirar luego de terminada la fabricación y, en ocasiones cuando las piezas son complejas son difíciles de extraer y además, es un desperdicio de material que se refleja en los costos de fabricación (Bihr et al., 2022).

Liu et al., describe la AM como una tecnología revolucionaria, que imprime directamente componentes tridimensionales (3D) capa por capa según modelos digitales como CAD, CNC y programación de simulación. Completamente diferente de los métodos de fabricación convencionales, como fundición, forjado y mecanizado; la AM es un proceso de fabricación de forma casi neta, que puede mejorar considerablemente la libertad de diseño y reducir el tiempo de producción.

Por lo tanto, la AM ofrece grandes oportunidades para la fabricación inteligente en la I4.0. Además, la AM es una clase de técnica de producción versátil, flexible y altamente personalizable, adecuadas para la fabricación de una amplia gama de materiales, incluidos metales, cerámicas y polímeros según Liu et al. (Liu et al., 2022).

Al reducir el uso de energía y las emisiones de carbono, las tecnologías de MA tienen un impacto positivo, tanto en la economía global como en el medio ambiente. La creación rápida de prototipos (RP), es una de las innovaciones de fabricación automatizada de más rápido crecimiento, con la capacidad de pasar de modelos CAD a productos terminados como lo detalla Shrinivas Mahale et al., (Shrinivas Mahale et al., 2021).

En la actualidad, cada vez es más importante la AM, ya que sus procesos se desarrollan rápidamente, tiene varias ventajas de aplicación en diferentes mariales y diversidad en fabricación de piezas de alta complejidad; además, los modelos computacionales están surgiendo para disminuir dificultades en el proceso (Singh et al., 2021).

En el proceso de la AM, la optimización en la fabricación de una pieza, es habitualmente realizada por un gran número de ensayos. Para ajustar las variables de proceso en la fabricación de una pieza, se inicia con un CAD, como paso intermedio puede realizarse un diseño de experimentos, que cubran diferentes niveles de las variables que se están optimizando, para luego imprimirse utilizando los valores de las variables predeterminadas, que pueden irse iterando según la planificación del diseño experimental.

Paso seguido, se realizan los ensayos mecánicos para analizar las propiedades obtenidas en cada caso y así definir las mejores condiciones del proceso. Esta técnica de optimización es costosa por los recursos que emplea: el tiempo de personal especializado, el tiempo de impresión, la cantidad de material que se requiere tanto para la pieza, como el que queda de desperdicio, el recurso de máquina tanto para la fabricación como para los ensayos mecánicos etc. (Sanguedolce et al., 2021^a).

Además, requiere el tiempo empleado de los investigadores, en la planificación del ensayo y posterior análisis estadístico de los resultados. Con la implementación de la ingeniería asistida por computador (CAE), se podría minimizar el número de piezas a imprimir; por lo tanto, se lograría disminuir parte de los gastos de recursos asociados a esta etapa (Cardeal et al., 2021^a).

La AM es un proceso nuevo, en el cual todavía las piezas fabricadas no cumplen en su totalidad con los requisitos funcionales; esto quiere decir, que las piezas tienen problemas de calidad, como defectos de forma y dimensión; estos errores son un desafío para la fabricación. Se deben optimizar los parámetros de la técnica, mejorando la calidad del producto, para que cumpla con los requerimientos (Yan et al., 2018).

La parte física del proceso abarca la interacción entre el calor y la masa, donde se genera metal líquido y luego se solidifica no equilibradamente, producto de la alta

velocidad de enfriamiento. Se deben comprender los mecanismos de generación de defectos, para evitar altos defectos en la fabricación, porque el material tiene una transición de fases (sólida-líquida-sólida), genera una transformación de la microestructura que influye en las propiedades mecánicas de la pieza final (Yan et al., 2018).

Por otro lado, la AM utiliza soportes para la generación de geometrías en voladizo, estas estructuras requeridas para la fabricación, es uno de los principales problemas para la AM, porque estas deben retirarse después de la fabricación, lo que puede ser un proceso complejo, ya que en algunos componentes no es de fácil acceso los soportes o algunos cuentan con paredes muy delgadas; lo que generan restricciones a la hora de su remoción, ya que no se cuenta con las herramientas necesarias para el proceso, lo que puede llevar a deformaciones o ruptura de la pieza (Korkmaz et al., 2022).

4.4 INNOVACIÓN EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

La innovación tecnológica proporciona grandes soluciones a la fabricación de piezas y productos con requerimientos complejos y especiales, donde la AM juega un papel importante; para que dicho proceso sea indispensable en la manufactura, se debe disminuir sus limitaciones como es el costo de producción (Sanguedolce et al., 2021b).

Este proceso tiene un futuro prometedor en el mantenimiento, porque le está apostando al almacenamiento de piezas de forma digital lo que representa una reducción en los gastos en bodegas de repuestos y también disminuye el tiempo de entrega de los repuestos (Cardeal et al., 2021b).

Por otro lado, con la pandemia de COVID-19, la AM jugó un papel importante, donde generó soluciones de diseño con el objetivo de disminuir tiempo, costo y material en la construcción de insumos escasos, que eran necesarios para la protección personal (Prabhu et al., 2021).

La AM es un proceso revolucionario con grandes beneficios para la industria, como la flexibilidad de las piezas, pero también trae desafíos como el rediseño de productos, habilidades necesarias, nuevas propuestas comerciales y cambios en la industria (Moshiri et al., 2020).

También se debe tener en cuenta el impacto al medio ambiente que la manufactura puede producir, porque este sector es el mayor consumidor de energía y materiales; por eso es de vital importancia reducir el consumo de materiales en el proceso de fabricación. Al generar una optimización con la ayuda de la simulación asistida por computadora en el proceso, disminuirá

favorablemente el consumo de materiales y energía para la fabricación de una pieza, logrando así la fabricación sostenible (Krishna & Srikanth, 2021).

4.5 MANUFACTURA ADITIVA DE METALES

Según Wu et al., la AM es innovadora porque puede crear componentes complejos, con la ayuda de diferentes materiales en polvo fusionados con un rayo láser; por lo tanto, la fusión y la dispersión del polvo, afectan las propiedades mecánicas y estructurales de la pieza (Y. Wu et al., 2022).

Las características del polvo como son el tamaño de partícula y la composición química, afectan el proceso determinando la temperatura y la forma de fusión en proceso de fusión por cama de polvo (LPBF), las partículas de polvo absorben la energía láser para fusionarse, por este motivo el polvo es la característica más importante de este proceso (Yao & Zhang, 2022).

El proceso de LPBF, es afectado por las altas tasas de enfriamiento y calentamiento generado por la fusión del material, generando gradientes de temperatura que son los responsables de las tensiones altas en la pieza, provocando distorsiones entre las capas, lo que conduce a baja calidad de las piezas creadas (Pauzon et al., 2021).

De hecho, el proceso LPBF afecta la microestructura y el desempeño mecánica, porque las altas tasas de enfriamiento y la dirección de crecimiento del grano causan la alteración de las propiedades mecánicas (Jam et al., 2022). Por lo tanto, las piezas por este proceso experimentan cambios de temperatura en cada capa a lo largo de la fabricación, generando defectos como porosidad por falta o por alta fusión del material metálico (Lough et al., 2022); lo que lleva a una baja calidad de los productos y un alto consumo de material y energía.

Según Sanguedolce et al., las innovaciones tecnológicas aportan grandes soluciones para la fabricación de piezas y productos, con requerimientos complejos y especiales, donde la AM juega un papel importante. Para que este proceso sea esencial en la fabricación actual de piezas complejas, se deben reducir sus limitaciones, como el alto costo de producción, desperdicio de material y tiempos de fabricación (Sanguedolce et al., 2021^a).

Para Cardeal et al, este proceso es muy prometedor en términos de mantenimiento, ya que apuestan por el almacenamiento digital de piezas, lo que significa menos almacenes para repuestos, menos tiempo de espera por ellos y menos tiempo de inactividad de la máquina que significan costos para la empresa (Cardeal et al., 2021^a).

Por otro lado, el sustrato es irradiado y calentado por el láser, y la conducción domina el proceso de transferencia de calor. Cuando la temperatura del sustrato es localmente superior al punto de fusión, se crea un baño de fusión. El cual, crea un gradiente de alta temperatura en la superficie del baño fundido, que impulsa el flujo del metal líquido.

A medida que el baño de fusión se mueve con el punto del láser, evolucionan los procesos de fusión y solidificación, se debe considerar el calor latente generado por la transición de fase, la transferencia de calor y el comportamiento del flujo en el láser.

El calor se transfiere del producto al entorno circundante por convección y radiación. Las propiedades de los materiales, incluidas las propiedades termofísicas y mecánicas, dependen de la temperatura. La interacción del láser, el polvo y el baño de fusión, no está del todo clara en la actualidad (Yan et al., 2018).

Para Liu et al, existen algunos factores preocupantes como el tiempo implícito y los esfuerzos residuales, debido a la forma de deposición intermitente de la AM, también tienen efectos significativos en el proceso de evolución de la microestructura, por lo que requieren más atención en el futuro.

Estos factores fundamentales de procesamiento y composición interactúan entre sí, a través de la redistribución de calor durante la AM, controlando conjuntamente las microestructuras fabricadas aditivamente. Por lo tanto, se requiere un enfoque integral de ambos lados en estudios futuros, para aprovechar el gran potencial de la AM (Liu et al., 2022).

Según Mayer et al., los diseños de AM a menudo se adaptan en función de la experiencia, ya sea compensando previamente la deformación esperada u optimizando el soporte y / o la estrategia de escaneo, para evitar costos causados por distorsiones residuales o grietas. Debido a la naturaleza compleja del proceso, este es un procedimiento iterativo, que requiere mucho tiempo y costos, se basa esencialmente en la experiencia de los operadores de la máquina.

Los proveedores de software CAE han introducido recientemente soluciones comerciales, con el objetivo de simular distorsiones y tensiones residuales antes de que sea necesario realizar costosas pruebas de producción, para pasar del diseño de AM basado en la experiencia a un método de diseño basado en simulación.

De este modo, la simulación del proceso de AM desempeñará un papel importante en el diseño de piezas y es clave para la transición de una mera experiencia a un método de diseño apoyado en el conocimiento basado en simulación, que explota al máximo el gran potencial de esta técnica de fabricación (Mayer et al., 2020).

Uno de los mayores problemas de la AM, son los altos costos para implementar este proceso, los pocos materiales que se pueden utilizar y lo más importante, la dificultad para estudiar los parámetros del proceso (De Ciurana et al., 2013). La contribución principal de esta investigación, es analizar un método de optimización para el proceso LPBF, que ha sido agregado recientemente al programa CAE, para el mejoramiento y optimización de los procesos de AM de metales (Prabhu et al., 2021).

Esta situación afecta a los investigadores de esta área al tener que realizar diseños de experimentos complejos, porque se deben optimizar y conocer el efecto de cada parámetro individual; además, cada prueba implica gran cantidad de tiempo y de material para fabricar una pieza; por lo tanto, se debe tener disponibilidad de recursos para los materiales utilizados y los equipos para la fabricación y pruebas.

Es importante resolver esta problemática, porque con la implementación de la CAE se podría ahorrar el proceso de ensayo y error; por lo tanto, se lograría disminuir parte de los gastos de recursos y el tiempo asociados a esta etapa. Además, se podría investigar más a fondo parámetros como la porosidad y la microestructura de los metales utilizados para la AM. Las consecuencias de no solucionar este problema, es no avanzar y mejorar el proceso con la ayuda de las nuevas herramientas tecnológicas, quedarse estancado en la investigación de nuevos parámetros de la MA.

4.6 PROCESO DE FUSIÓN POR CAMA DE POLVO

El proceso LPBF, también conocido comúnmente como fusión selectiva por láser (SLM), es uno de los procesos de la AM, que utiliza un rayo láser enfocado para fusionar selectivamente una cama de polvo metálico, para construir un componente tridimensional capa por capa.

Este proceso crea piezas altamente complejas, con diferentes formas y propiedades mecánicas mejores a comparación con la técnica de forjado. Por lo tanto, se ha convertido en el proceso preferido para la fabricación de moldes con canales de enfriamiento, que antes eran difíciles de fabricar por procesos convencionales (Sabooni et al., 2021).

Con el proceso de LPBF se puede crear sin fin de geometrías complejas con diferentes materiales metálicos, lo que la hace un proceso innovador y con una gran adopción en la industria, por lo que en la fabricación se utiliza la deposición incremental de polvo metálico para fabricar la pieza a partir de un modelo digital (du Plessis et al., 2022).

Al ser un proceso nuevo, todavía las piezas fabricadas no cumplen en su totalidad con los requisitos funcionales; esto quiere decir, que las piezas tienen problemas de calidad, como defectos de forma y dimensión; estos errores son un desafío para la fabricación; se deben optimizar los parámetros de la técnica, para mejorar la calidad del producto y así cumplir con los requerimientos (Yan et al., 2018).

El proceso de LPBF tiene algunos problemas y desafíos como la porosidad, pandeo entre capas, deformación de las capas, etc., parámetros incorrectos del proceso generan una fabricación incorrecta de la pieza (Smoqi et al., 2022).

Los parámetros del proceso influyen en los diferentes defectos de fabricación; por ejemplo, la densidad de la energía afecta sobre la porosidad, la velocidad y potencia del láser, influyen en la dirección y tamaño del grano (Čapek et al., 2022).

Dentro de las variables de los procesos más comunes para la AM, se encuentran la potencia del láser, el grosor de la capa, la velocidad de escaneo del láser, patrón de escaneo, entre otras. Estas condiciones ayudan a generar materiales densos, disminuir rugosidad y defectos. Obteniendo los parámetros adecuados, se puede mejorar los problemas relacionados a la fabricación como la porosidad, esfuerzos residuales, entre otros.

Los defectos que se producen frecuentemente, van desde el agrietamiento hasta la porosidad de la pieza que conduce al fallo, al variar algunos parámetros de fabricación da como resultado, que a baja potencia se generan poros irregulares por la poca energía de fusión, mientras que si hay exceso de calor se forman poros esféricos. Por otro lado, el causante de las grietas es debido a los esfuerzos residuales a tensión generadas en el límite de grano (Yan et al., 2018).

La porosidad es un problema frecuente ocasionado por la potencia del láser, que produce una alta fusión que a su vez se ve reflejada en pequeños charcos de fusión, generando que el metal se evapore y cree burbujas de gas que quedan atrapadas llamadas “porosidad”. Por otro lado, la distorsión y el esfuerzo residual son un desafío para la AM, el esfuerzo residual se produce debido a los gradientes térmicos durante el proceso, lo que provoca expansión y contracción en el material y consecuentes estados de esfuerzos de compresión o tensión.

La distorsión se genera cuando las tensiones residuales son más altas que el límite elástico del material, lo que produce deformación plástica y con ello problemas en la funcionalidad de la pieza, como no cumplir las tolerancias requeridas, la planicidad o incluso llegando a presentar un agrietamiento en el material (Oliveira et al., 2020).

Según un estudio de Wu et al., reveló la interacción única láser-metal en una cama de polvo; en una cama de polvo esférico, es razonable usar empaquetamiento medio y empaquetamiento local, ya que la distribución espacial del polvo esférico es a menudo más homogénea; sin embargo, los resultados sugirieron que la importancia del empaque local, no debe pasarse por alto en una cama de polvo debido a la mayor variación del empaque local, que potencialmente puede afectar la calidad de la pieza.

El tamaño de partícula más grueso y la densidad numérica más baja del polvo, provocan una fluctuación más severa de la absorción de energía láser, que desestabiliza el baño de fusión e induce porosidad cuando la entrada de energía láser está en el régimen de enclavamiento (Z. Wu et al., 2021).

Por otro lado, al proceso LPBF se asocian tasas de enfriamiento altas, que podrían ser la causa de formación de fases en desequilibrio en la solidificación de la estructura, según el historial térmico y materia prima de las muestras. (Sabooni et al., 2021).

Esta técnica ha sido ampliamente estudiada, y se han definido parámetros de procesamiento óptimos, que incluyen la potencia del láser, el grosor de la capa, la velocidad de escaneo del láser, el patrón de escaneo, etc. Se ha definido la ventana de proceso, con valores óptimos que generan materiales densos, reducen la rugosidad y los defectos para mejorar el rendimiento del material, con lo que se comprueba que la obtención de parámetros adecuados, puede mejorar los problemas relacionados con la fabricación, como la porosidad, la tensión residual, etc. (Oliveira et al., 2020).

Para Oliveira et al., el proceso de fusión por cama de polvo es complicado, por esta razón para cada material se crearon diferentes condiciones de procesamiento, como es la configuración de la máquina y los parámetros. Se encuentran más de cien parámetros que se utilizan habitualmente para producir materiales densos, disminuir defectos, minimizar la rugosidad y los tiempos de fabricación.

Actualmente, los parámetros solo se utilizan para mejorar los resultados en el material; donde, los parámetros generales sólo priorizan algunos requerimientos, sin tener oportunidad para una mejor optimización de la pieza y sus aplicaciones. Además, incluso para el mismo material, los parámetros optimizados cambian constantemente a medida que los fabricantes introducen nuevos equipos, tecnologías y procesos (Oliveira et al., 2020).

4.7 ACERO INOXIDABLE 17-4 PH

El 17-4PH es un acero inoxidable, tiene buena resistencia mecánica, excelente resistencia a la corrosión, maquinabilidad y tenacidad, debido al endurecido por precipitado producto de una matriz martensítica, se utiliza para aplicaciones de la industria química, eléctrica, marítima y aeroespacial por su máxima temperatura de servicio de 315°C.

Tradicionalmente, para generar un proceso de tratamiento térmico en el 17-4PH es por envejecimiento, donde se puede obtener una matriz martensítica y precipitados de Cu con una estructura cristalina BCC, que son favorables para la resistencia.

En los últimos años las investigaciones se han interesado sobre los nuevos procesos de fabricación y tratamientos térmicos donde se pueda mejorar el equilibrio entre las propiedades mecánicas y la microestructura del 17-4PH (Li et al., 2022).

El acero inoxidable 17-4PH se utiliza para hacer recubrimientos, debido a su buen rendimiento tanto por sus propiedades mecánicas, como por su excelente unión metalúrgica entre el sustrato y el recubrimiento. Las investigaciones actuales se centran en mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la corrosión, al desgaste y erosión por cavitación.

En el trabajo de Nie et al., se estudia los recubrimientos del acero inoxidable 17-4PH y cómo afecta la microestructura y el tamaño de grano, por la potencia del láser en la microdureza y la fuerza de unión. Obtuvieron como resultado que cuando se tiene 2200 W de potencia laser, la fuerza de unión y la microdureza son más altas respecto a otras muestras. Esto se debe a que cuando existe una adecuada potencia láser, se genera un grano refinado y por lo tanto se disminuyen los microdefectos en la matriz, mejorando la fuerza de unión (Nie et al., 2022).

El acero inoxidable 17-4 PH es utilizado para la fabricación de moldes de inyección; estos moldes pueden mejorar el rendimiento utilizando canales de enfriamiento conformado, con esto se puede reducir el tiempo de enfriamiento y la distribución del calor, influyendo en la disminución del tiempo de proceso y la calidad del producto. El proceso LPBF en los últimos años se ha utilizado para la fabricación de moldes de enfriamiento conformes (Sabooni et al., 2021).

Actualmente, se desconoce a profundidad sobre la microestructura del 17-4PH fabricado por AM; por lo tanto, las investigaciones actuales están centradas en la composición química de la materia prima y como afecta la solidificación,

propiedades mecánicas y microestructura por LPBF del 17-4PH (Sabooni et al., 2021).

La LPBF es uno de las técnicas más representativas de la AM, basada en fabricación con polvo metálico; tiene la ventaja de una alta exactitud de forma aplicada al 17-4PH. Sin embargo, la difícil interacción metalúrgica durante la fabricación por LPBF genera varios defectos como, malas propiedades mecánicas, porosidad, grietas. Para resolver estos diferentes problemas se han centrado en diferentes aspectos como: los parámetros de proceso, técnica de atomización del polvo y posprocesamiento térmico.

En la parte de los parámetros de procesos, una estrategia que se puede implementar es el doble escaneo para una mayor densidad y mejores propiedades mecánicas; por otro lado, la dirección de exploración contribuye al cambio de porosidad durante la formación. En el método de atomización con agua del polvo genera mejores acabados superficiales y depósitos uniformes; sin embargo, no todas las fabricaciones se pueden ajustar al mismo método; por esto, para mejorar las propiedades mecánicas del 17-4PH se deben realizar posprocesamiento térmicos (Li et al., 2022).

Según la investigación de Sabooni et al., se utilizó el proceso de LPBF para fabricar componentes con dos polvos ligeramente diferentes de 17-4PH, sometidos a tratamientos térmicos con el fin de cambiar su microestructura para mejorar las propiedades mecánicas, como resultado obtuvieron que la microestructura depende en gran medida de la composición química del polvo (Sabooni et al., 2021).

Según Yang et al., el proceso de LPBF permite fabricar piezas complejas ahorrando material y tiempo, este artículo investigó el proceso de fabricación y el posprocesamiento utilizando acero inoxidable 17-4PH. Se dieron cuenta que la superficie no era de calidad; por lo tanto, se exploró el posprocesamiento mediante el pulido mecánico, recubrimiento por deposición de vapor y prensado en caliente para generar alta calidad en la superficie y densidad.

La probeta se caracterizó por su rugosidad superficial y brillo que mejoraron después del posprocesamiento. Este estudio demostró que el proceso y el posprocesamiento óptimos, podrían mejorar las cualidades de los productos, también depende mucho de la potencia del láser y la velocidad de escaneo.

El acero inoxidable 17-4 PH es menos costoso que las aleaciones de titanio y posee excelentes propiedades (resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, resistencia térmica, alta resistencia y dureza). Para obtener alta calidad de la superficie se realizó un pulido mecánico automático; este estudio puede demostrar que la alta calidad de la superficie de las piezas de acero inoxidable 17-

4PH, se logró mediante la combinación de la optimización de los parámetros de fabricación aditiva, junto con técnicas de posprocesamiento debidamente diseñadas (Yang et al., 2021).

Se sabe que para mejorar las propiedades mecánicas del 17-4PH fabricado por LPBF, se debe realizar tratamientos posteriores para un mejor rendimiento de la pieza. Según Li et al., alterar el comportamiento de la martensita y la precipitación con la ayuda del tratamiento térmico, da como resultado mejores propiedades mecánicas de las aleaciones 17-4PH fabricadas por AM (Li et al., 2022).

Luego del proceso de fabricación del acero inoxidable 17-4 PH es esencial realizar un posterior tratamiento térmico, con el fin que se ajuste a los requerimientos deseados, tanto en las propiedades mecánicas como también la resistencia a la corrosión. La alta dureza y resistencia se obtiene por un envejecido a altas temperaturas que oscilan entre 480 a 620 °C, logrando precipitados ricos en cobre (Sabooni et al., 2021).

El tratamiento térmico tradicional para 17-4PH, consiste en utilizar temperaturas por encima de 1000°C para generar una microestructura martensita sobresaturada; la variación de la temperatura y el tiempo cambia las propiedades mecánicas; por ejemplo, el tratamiento de envejecimiento a 485°C durante una hora aumentan la dureza y resistencia, en cambio a una temperatura de 593°C a 4 horas, mejora la ductilidad y la tenacidad.

4.8 MICROESTRUCTURA EN ADITIVA

En la actualidad, muchos trabajos se concentran en el diseño de experimentos para tener una microestructura deseable, pero este método conlleva mucho tiempo y dinero; en cambio un método computacional es más eficiente, donde se controla la velocidad de enfriamiento para lograr un control de la microestructura.

La velocidad de enfriamiento y el gradiente de temperatura, son los fenómenos físico más importantes para la solidificación de los metales; los cuales, establece la orientación, tamaño y morfología del grano. La tasa de enfriamiento en la fabricación de componentes, es uno de los factores más importantes; por ejemplo, si esta es alta, podría causar segregaciones altas de material teniendo como resultado baja dureza de la capa. Por lo tanto, la alta tasa de enfriamiento produce granos más finos (Yan et al., 2018).

Por otro lado, el acero inoxidable 17-4 PH comercial tiene una estructura martensítica, no es la misma estructura que tiene el acero inoxidable 17-4 PH para AM. Si bien, conserva la estructura martensítica dominante, pero posee

pequeñas cantidades de austenita retenida (RA) para la fabricación con atmosfera de argón (Ar), en cambio para una atmosfera de Nitrógeno (N₂), se tiene una mezcla de martensita y austenita. En la atmosfera de N₂ la estructura granular era más fina, mientras que en la de Ar, se observaron granos gruesos y alargados (Sabooni et al., 2021).

Sin embargo, en el 17-4PH fabricado aditivamente, el comportamiento es diferente en la recrystalización y precipitación por la microestructura anisotrópica; por lo tanto, la homogeneización de la microestructura y la precipitación son fundamentales, para obtener buenas propiedades mecánicas por fabricación aditiva del 17-4PH (Li et al., 2022).

4.9 PROPIEDADES MECÁNICAS EN ADITIVA

Las propiedades del material dependen del cambio de fase y de la temperatura como la conductividad, está determinada la velocidad de transferencia del calor en el material, afectando la distribución de la temperatura.

Según Yan et al., la conductividad térmica efectiva del polvo de metal suelto, está controlada por el gas en los poros, que es aproximadamente 100 veces menor que la del material denso, y la conductividad térmica efectiva vuelve al valor real, cuando la temperatura es más alta que el punto de fusión.

Las propiedades físicas de la zona blanda durante la solidificación, se definen como el promedio ponderado de las fases isotrópicas y sólido-líquidas. En un modelo termomecánico, las propiedades físicas como el coeficiente elástico, el límite elástico y el coeficiente de expansión térmica dependen de la temperatura (Yan et al., 2018).

4.10 DEFORMACIÓN

En la fabricación intervienen cambios rápidos de temperatura, que provocan deformaciones indeseables y también generan distorsiones en la geometría de la pieza. En la fabricación de la pieza se producen tensiones residuales, debido a las tensiones térmicas no homogéneas del proceso, generando agrietamientos, reducción de la vida útil y fallas prematuras en los componentes. La deformación está relacionada con el gradiente de temperatura, la resistencia mecánica y el coeficiente de expansión térmica (Yan et al., 2018).

Las tensiones térmicas se producen por las variaciones de temperatura en la fabricación; por otro lado, la deformación total es la suma de la deformación

elástica con la plástica, la deformación en la pieza es generada por muchos parámetros que intervienen en la AM, como son los parámetros de la máquina, de los cuales los más importantes son la velocidad y la potencia del láser, que afectan directamente el calentamiento y enfriamiento de la pieza y es el causante de la deformación (Bihr et al., 2022).

El método de deformación inherente calibrada con datos experimentales, da resultados de deformación y tensión residual, con solo utilizar ecuaciones mecánicas, con el fin de reducir en la fabricación los defectos sin perder el funcionamiento de la pieza (Bihr et al., 2022).

Existe otra solución la cual, consiste en transformar la geometría, para reducir los defectos por medio de la optimización topológica, este proceso tiene la ventaja de tener recursos computacionales económicos (Bihr et al., 2022).

La separación de la pieza de la placa base y los soportes genera deformaciones; estas deformaciones son un problema nuevo y un fenómeno complicado para simular con exactitud. En la actualidad se adelantan investigaciones al respecto.

Según Bihr et al., se puede realizar optimizaciones en las piezas y sus soportes paralelamente para mejorar la deformación; el modelo que utilizaron tiene fallos al no poder imitar algunos resultados prácticos, como es la deformaciones plásticas; ya que este modelo solo puede trabajar con la parte elástica (Bihr et al., 2022).

4.11 ESFUERZOS TÉRMICOS

Según Yan et al., los parámetros de fabricación influyen en el baño de fusión y la temperatura mas no está directamente relacionada con la calidad del producto aunque si depende de la tensión residual y la microestructura (Yan et al., 2018).

Se han investigado los diferentes parámetros de fabricación del proceso de LPBF: la potencia y velocidad del láser, como también la velocidad de alimentación del polvo, todos ellos tienen relación con la calidad de la pieza. Por ejemplo, la temperatura aumento con una mayor potencia y una velocidad más pausada de láser y la tasa de enfriamiento disminuyó con una mayor potencia y velocidad del láser.

En este artículo se habla sobre la relación de los parámetros en el comportamiento térmico con la calidad. Para controlar la deformación y la microestructura en una pieza se debe identificar la conducta térmica. Se realizan investigaciones sobre el comportamiento térmico y su importancia en la calidad de la pieza (Yan et al., 2018).

Por las altas y diferentes temperaturas que se experimentan en la fabricación, se genera la expansión térmica y los enfriamientos abruptos en el material, provocando tensión térmica que da como resultado distorsiones y agrietamiento de la pieza; por lo tanto, es primordial el control y prevención de la tensión térmica para evitar estos defectos en piezas de gran tamaño.

El comportamiento térmico, es la clave del cambio de la microestructura, la transformación de la tensión y el patrón de convección del fluido, influyendo en la calidad del producto. Este artículo concluye diciendo que en la fabricación aditiva de cama de polvo lo que más afecta es el campo de temperaturas; hacer un monitoreo de estas temperaturas mejora la calidad de producto (Yan et al., 2018).

4.12 SIMULACIÓN MANUFACTURA ADITIVA

Los procesos de fabricación de AM, abarcan diversas técnicas en creciente desarrollo. En la continua investigación para el mejoramiento de la técnica LPBF, la AM permite el desarrollo de piezas de cualquier complejidad a partir de un diseño asistido por computadora y utilizando equipos de tecnología avanzada.

La optimización en la fabricación de una pieza es generalmente es por diseño de experimentos; comúnmente, para ajustar las variables de proceso de una pieza, se inicia con un CAD, luego se imprime con variables predeterminadas, que pueden ir iterando según la planificación del diseño experimental. Paso seguido, se realizan los ensayos para analizar las propiedades mecánicas obtenidas en cada caso y así definir las mejores condiciones del proceso.

Esta técnica de optimización es costosa por los recursos que emplea: el tiempo de personal especializado, el tiempo de impresión, la cantidad de material que se requiere tanto para la pieza, como el que queda de desperdicio (De Ciurana et al., 2013).

Además, requiere el tiempo empleado de los investigadores en la planeación del ensayo y posterior análisis estadístico de los resultados. Con la implementación de la CAE se podría ahorrar el proceso de ensayo y error; por lo tanto, se lograría disminuir alguna parte de los gastos de recursos asociados a esta etapa (Cardeal et al., 2021^a).

Así mismo, los software CAE (Computer aided engineering) han avanzado hasta el punto que es posible simular procesos de manufactura complejos. Al tener esta tecnología de punta, es necesario conocerla a profundidad e integrar conjuntamente para determinar su verdadero potencial mediante el estudio de las variables óptimas del proceso, su versatilidad y la metodología adecuada para la optimización.

Ya existen en la actualidad algunas investigaciones de simulación de AM de metales, para el proceso de cama de polvo que realizó Bihr et al., en este artículo exploran la manera de optimizar la geometría de las piezas y sus soportes, con la ayuda de la topología para reducir las imperfecciones en la fabricación de este proceso complejo, como es las tensiones residuales y el deformación capa a capa. Estas imperfecciones generan restricciones en el cumplimiento de los requerimientos de la pieza, lo que conlleva problemas en el rendimiento del funcionamiento (Bihr et al., 2022).

Por otro lado, al estudiar la porosidad en una pieza, esta provoca retos que implican la geometría y la fabricación; en la actualidad, no se ha investigado todo su potencial, porque los softwares que existen tienen limitaciones; teniendo en cuenta que la porosidad es importante, ya que influye en propiedades como la densidad, el aislamiento térmico, la permeabilidad, entre otras. Determinar su cantidad mediante simulación, puede ser un aporte de gran potencial en la AM, ya que permite su planificación en la fabricación (Shigueoka & Volpato, 2021).

Los modelos numéricos son importantes para simular el comportamiento de la temperatura en el baño de fusión; así poder predecir la deformación, tensión residual y la microestructura (Yan et al., 2018).

Por lo tanto, se quiere demostrar las posibilidades que ofrece la simulación asistida por computador, en cuanto a mejorar eficientemente el proceso de la AM, disminuyendo tiempo, los costos y el consumo de material en el proceso de fabricación de piezas con la ayuda de ANSYS Additive.

Este programa garantiza la óptima y rápida impresión de la pieza de trabajo; ayuda a predecir la distorsión, el esfuerzo producido, los esfuerzos residuales, la deformación térmica, generación automática de apoyos, patrón de escaneo, entre otros. Además, se pueden predecir los resultados a nivel de microestructura como la porosidad en el material y parámetros para la máquina.

Se propone un análisis de estos parámetros a partir de simulaciones de AM realizado con ANSYS Additive, para mejorar eficientemente el proceso de la AM por la técnica LPBF, reduciendo tiempo, el costo y el consumo de material en el proceso de construcción de partes.

Con este estudio se quiere mostrar las posibilidades que ofrece la simulación asistida por computador en cuanto a mejorar eficientemente el proceso de la AM, disminuyendo tiempo y costos en el proceso de fabricación de piezas con la ayuda de ANSYS Additive.

Este programa garantiza la óptima y rápida impresión de la pieza de trabajo; ayuda a predecir la distorsión, el estrés producido, los esfuerzos residuales, la deformación térmica, generación automática de apoyos, patrón de escaneo, entre otros. Además, se pueden predecir los resultados a nivel de microestructura como la porosidad en el material y parámetros para la máquina.

Con ANSYS Additive se reduce el tiempo, el costo y el consumo de materiales para la fabricación y también se mejora el diseño de una pieza; es una tecnología revolucionaria con ventajas sobre los métodos de fabricación tradicional. El proceso utilizado para la simulación es un proceso capa por capa a través de Laser Power Bed Fusión (LPBF), un proceso de fabricación aditiva que utiliza un láser para fundir polvos metálicos. Los métodos de simulación utilizan la acumulación de tensión intrínseca capa por capa para predecir esta deformación (Ansys, 2021).

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1 VARIABLES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA

Para identificar las variables más importantes de la simulación de manufactura aditiva en relación a la eficiencia y la aplicabilidad industrial, primero se estudiaron cuáles eran los diferentes parámetros que se utilizan y luego se analizó la influencia en la fabricación aditiva.

Ansys Additive Science, está diseñado para determinar los parámetros óptimos de los materiales metálicos y de la máquina; contiene la posibilidad de simular dos propiedades, la porosidad y tamaño del grano. La porosidad indica la cantidad de espacios o poros del material.

Por otro lado, el tamaño de grano afecta las propiedades mecánicas del material; por ejemplo, el tamaño de grano pequeño confiere mayor dureza y resistencia a la tracción al material.

Los parámetros a tener en cuenta para generar la simulación donde se defina la porosidad y el tamaño de grano, son el tipo de material a utilizar y la temperatura de la cama o base y la potencia del láser; también se debe ingresar las dimensiones de la geometría.

Ansys Additive Print puede simular tres variables esenciales para garantizar la calidad de la pieza, los cuales son el esfuerzo térmico, el patrón de escaneo y la deformación asumida. El esfuerzo térmico, se genera cuando se presenta una diferencia de temperatura en el material que produce diferentes gradientes de deformación mecánica dentro de él, incluso llegando a deformarse hasta su fractura.

Este parámetro depende (desde el punto de vista del material), de propiedades como el módulo de elasticidad, el límite elástico (yield strength), el coeficiente de Poisson y los coeficientes anisótropos. Desde el punto de vista de la geometría depende de la pieza y sus dimensiones, y desde el punto de vista del proceso depende del tipo de soportes que debe tener.

Para ello, el software puede configurar parámetros como temperatura base (°C), grosor de la placa (μm), el ángulo de la capa inicial (°), el ángulo del láser (°), el ancho de la franja de corte (mm), diámetro del rayo láser (μm), la potencia del láser (W) y la velocidad de escaneo (mm/s).

El segundo parámetro es el patrón de escaneo; el cual, es la forma como se orientan los vectores de escaneo para rellenar cada capa; para la simulación se utiliza todo lo anterior pero a diferencia en la configuración de la máquina, sólo está el grosor de la placa (μm), ángulo de la capa inicial y el ángulo del láser. Y el tercer parámetro es la deformación asumida, que solo depende de la geometría seleccionada, los soportes y la configuración del material.

5.1.1 Simulación de Porosidad.

Esta simulación se usa para obtener los niveles de porosidad en el material solo para los producidos por falta de fusión. Para la configuración de la máquina se deberá considerar el patrón de escaneo y en la configuración de la geometría se deberá considerar las dimensiones de la pieza.

5.1.2 Esfuerzos térmicos.

Los esfuerzos térmicos requieren un tiempo computacional menor en comparación a la porosidad. La simulación predice el ciclo térmico que afecta la pieza con la acumulación de la deformación. Cada vez que se calienta la pieza por encima de la temperatura de fusión, se produce un esfuerzo térmico. Para realizar una simulación de esfuerzos térmicos se deberá tener en cuenta una buena resolución de la malla, un factor de escala que controla la precisión en la simulación y el tipo de material.

5.1.3 Parámetros de la máquina para una simulación de esfuerzo térmico.

Los parámetros requeridos adicionales a los de patrón de escaneo para esta simulación son la temperatura de la placa base, la potencia del láser y la velocidad de escaneo.

5.1.3.1 Patrón de escaneo.

La simulación de patrón de escaneo tiene en cuenta que la tensión se genera en la dirección de escaneo. Además, se debe considerar el coeficiente de deformación anisotrópica del material y parámetros de la máquina como el espesor de capa (μm), el ángulo de la capa inicial y el ángulo de rotación de la capa.

5.1.3.2 Coeficiente de tensión anisotrópica.

Cuando el material es anisotrópico, se genera un esfuerzo y este depende de la dirección en la cual se genera el esfuerzo. El coeficiente de tensión anisotrópica se utiliza para observar el comportamiento de la deformación en el sistema de coordenadas.

Si el esfuerzo se genera de forma longitudinal, la deformación predicha en la dirección en que el láser está escaneando los principales píxeles de relleno se multiplicarán por 1,5. Entonces, el coeficiente de deformación anisotrópica ($\parallel$) = 1,5. En cambio, si el esfuerzo se da de forma transversal, la deformación predicha es ortogonal a la dirección en la que el láser escanea el relleno principal, en este caso, el coeficiente de deformación anisotrópica es ($\perp$) = 0,5. Si el esfuerzo se genera por profundidad, la deformación predicha en la dirección Z será multiplicada por 1; entonces, el coeficiente de deformación anisotrópica (z) = 1.

5.1.4 Parámetros de la máquina para una simulación de patrón de escaneo.

Cuando se utiliza una pieza para la simulación el programa utiliza una función de división interna llamada “segmentación”; el cual, asume un patrón de exploración de franjas giratorias con contorno; es decir, divide la pieza para generar de forma circular cada capa. Los parámetros requeridos son el grosor de la capa, el ángulo de la capa inicial y el ángulo de rotación de la capa.

5.1.5 Deformación asumida o residual.

La deformación residual es una desventaja en la fabricación de piezas por LPBF y determinarla es crucial para entender las limitaciones de la MA; para así, disminuirla o en el mejor de los casos evitarla [19].

La simulación más rápida que tiene el programa es la deformación asumida; la cual, se produce dentro de la pieza durante su construcción. Esta deformación es igual al factor de escala de tensión (SSF) por el límite elástico sobre el módulo elástico observado en la ecuación 1 [20].

$$\varepsilon = \frac{SSF \sigma_{yield}}{E} \quad (1)$$

El SSF cuantifica las variables de construcción y se determina de forma experimental dependiendo de las variables de la máquina tales como: deformación, modo de tensión y material.

5.1.6 Configurar una simulación de deformación asumida.

5.1.6.1 Número de núcleos.

Para una simulación óptima en ANSYS Additive permite especificar varios núcleos de procesador. Dependiendo de su computadora puede tener hasta 12 núcleos para uso, el valor establecido es 4.

5.1.6.2 Tamaño de vóxel (mm).

Un vóxel es un elemento hexaédrico (cúbico) utilizado en el método de elementos finitos. Cuando se combinan, los vóxeles definen el dominio de la geometría. El tamaño mínimo de vóxel es el estimado que se puede ejecutar de forma segura sin que la simulación corra el riesgo de fallar debido a memoria insuficiente, se calcula automáticamente cuando se importa la pieza. Se recomienda un tamaño de vóxel mínimo y una estimación del uso de la memoria. El rango es de 0,02 a 10 mm y el tamaño de vóxel predeterminado es de 0,5 mm.

5.1.6.3 Frecuencia de muestreo de vóxeles.

La función de voxelización divide el dominio en vóxeles para la simulación en Mechanics Solver. La técnica emplea sub-vóxeles dentro de cada vóxel para representar mejor la geometría, en particular en los bordes y curvas. A veces puede ser necesario un número mayor que el predeterminado de 5 vóxeles para capturar adecuadamente los soportes finos y las características de la pieza.

5.1.7 Uso de soportes automáticos.

De forma predeterminada, la aplicación ANSYS Additive crea soportes automáticamente para la pieza. Es importante comprender cómo se implementan estos soportes automáticos. La aplicación simula la construcción del proceso con un conjunto inicial de soportes basado únicamente en consideraciones de geometría, y luego genera dos nuevos conjuntos de soportes optimizados basados en los resultados de la simulación.

5.1.8 Parámetros de soporte sólido.

Para crear soportes sólidos en una pieza es necesario tener en cuenta parámetros como son el espesor de pared, la potencia del láser, la velocidad de escaneo, los ángulos de cada capa, el espesor de la capa, el espaciado entre cordones y la temperatura de la placa base.

5.1.8.1 Ángulo de voladizo mínimo.

El ángulo de voladizo se mide desde la superficie del lecho de polvo (horizontal= 0 grados) hasta la superficie de la pieza. Se admitirá cualquier punto de la superficie de la pieza que tenga un ángulo inferior al ángulo de voladizo mínimo. El Ángulo de voladizo mínimo predeterminado es de 45 grados.

5.1.8.2 Espesor de pared mínimo y máximo (μm).

El espesor de pared mínimo y máximo son parámetros utilizados para los soportes sólidos optimizados. El espesor de pared mínimo es el soporte más delgado posible que construirá la máquina. Por lo general, especificará el espesor de un escaneo de un solo cordón. El valor predeterminado es 100 micrones. El espesor de las paredes de soporte no excederá el espesor máximo de la pared y el rango será de 20 a 500 micras.

5.1.8.3 Potencia láser (W).

La potencia del láser en la máquina, debe estar entre 50 y 700 Watts, está establecido en 195 Watts.

5.1.8.4 Velocidad de escaneo (mm/s).

La velocidad de escaneo es a la que se mueve el escáner para derretir el material, excluyendo las velocidades de salto y las velocidades ascendentes y descendentes. Debe estar entre 350 y 2500 mm/seg. El valor establecido es 1000 mm/seg.

5.1.8.5 Diámetro del rayo láser (μm).

Es el ancho del láser en la superficie del polvo, este valor lo proporciona el fabricante de la máquina. Debe estar entre 20 y 140 μm . El valor establecido es 100 μm .

5.1.8.6 Ángulo de capa inicial.

Es la orientación del relleno en la primera capa de la pieza. Se mide desde el eje X; es decir, que el grado 0 es paralelo al eje X. El ángulo de la capa inicial suele establecerse en 57°. Debe estar entre 0 y 180°. Establecido a 57°.

5.1.8.7 Ángulo de rotación de capa.

Es el ángulo de orientación de exploración que cambia de una capa a otra. Suele ser de 67 grados. Debe estar entre 0 y 180°. Establecido a 67°.

5.1.8.8 Espesor de capa (μm).

Es el espesor de recubrimiento que se aplica en cada pasada de la cuchilla. Se recomienda utilizar el espesor real para su máquina y material de construcción. Debe estar entre 10 y 100 micras. Por defecto a 50 micras.

5.1.8.9 Espaciado entre cordones (μm).

Esta es la distancia de escaneo cuando se mueve el láser de un lado al otro. El espaciado entre cordones debe permitir una ligera superposición de las pistas del vector de escaneo, de modo que parte del material se vuelva a derretir para garantizar cobertura total del material sólido. Debe estar entre 10 y 1000 micras. El valor establecido es 100 micrones.

5.1.8.10 Temperatura de la placa base ($^{\circ}\text{C}$).

La temperatura controlada de la placa base. Debe ser un número real entre 20 y 500. El valor establecido es 80 $^{\circ}\text{C}$.

5.1.9 Otros parámetros.

Los siguientes parámetros (Tabla 10) son también importantes como los del apartado 2.8 pero menos relevantes a la hora de generar la simulación, estos parámetros ayudan con la exactitud de los resultados, por defecto se dejan con valores predeterminados por el software. Los parámetros y los rangos son los siguientes:

Tabla 10. Rango de parámetros.

Parámetros	Rango
Ancho de la raya de corte (mm)	1 a 100
Factor de resolución de malla	1 a 12
Altura mínima de apoyo (mm)	0 a 25
Radio del límite elástico del soporte	0,01 a 1
Soporte Factor De Seguridad	0,1 a 10

Distancia máxima a la pared (μm)	0 a 10000
Espesor mínimo de pared (μm)	0 a 10000
Espesor Máximo de Pared (μm):	0 a 10000
Distancia a la pared (μm):	0 a 10000

5.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EXPERIMENTALES.

5.2.1 Fabricación de probetas.

5.2.1.1 Descripción de la máquina.

Para la fabricación de las probetas, se utilizó la máquina M2 Cusing Multiláser de la marca CONCEPTLASER como se muestra en la Figura 8, del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) de Querétaro, México.

Figura 8. Máquina por cama de polvo.



Fuente: (Metal Working World Magazine, 2018)

Las especificaciones de la máquina se muestran en la Tabla 11; además, se pueden utilizar diferentes materiales como son: acero inoxidable, aleación de aluminio (AlSi10Mg), aleación de titanio (TiAl64V), titanio puro Grado 2, acero para trabajo en caliente, acero inoxidable para trabajo en caliente, acero inoxidable endurecido por precipitación (17-4PH), aleación base níquel (Inconel 718),

aleación base níquel (Inconel 625), aleación de cobalto-cromo (F75), aleación de cromo-cobalto y aleación de titanio.

Tabla 11. Especificaciones de la máquina.

Dimensiones de construcción (mm) (x, y, z):	250 x 250 x 280
Espesor de la capa	20 – 80
Velocidad de producción (cm ³ /h) (dependiendo del material/ potencia del láser):	2 – 35
Láser (W):	2 x 200
Velocidad de escaneo (m/s):	Máx. 4,5
Diámetro del láser (µm):	50 – 500
Condiciones de operación	15 – 35
Materia placa base	Acero inoxidable 316
Dimensiones placa base (mm):	245 x 245
Temperatura precalentamiento	No hubo
Temperatura ambiente (°C):	23 – 25
Tipo de gas	Gas argón

5.2.1.2 Material.

Tanto las propiedades mecánicas como los defectos que se generan en las piezas fabricadas aditivamente dependen en gran medida de la composición química del material; cabe resaltar que la composición química del material varía dependiendo del proveedor.

El proveedor del polvo de acero inoxidable endurecido por precipitación (17-4PH) es CONCEPTLASER es una empresa de aditivos GE; el cual, presenta una composición química mostrada en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12. Composición química del 17-4PH.

Componente	Valor indicativo (Peso en %)
C	0 – 0,07
Mn	0 – 1
P	0 – 0,04
S	0 – 0,03
Si	0 – 1
Cr	15 – 17,5

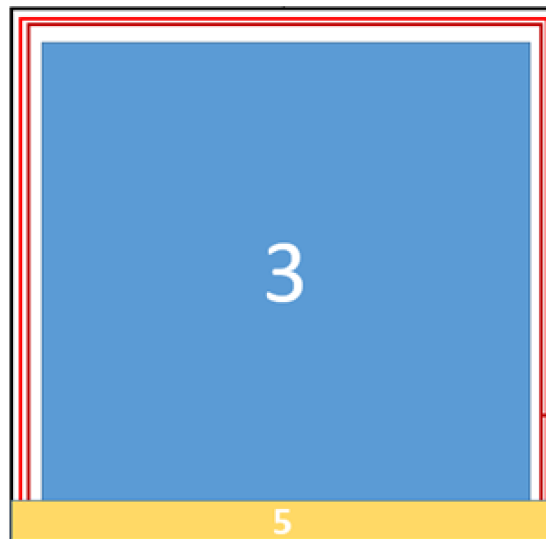
Ni	3 – 5
Cu	3 – 5
Nb + Ta	0,15 – 0,45
Fe	Balanceado

Fuente: (Composition, n.d.)

5.2.1.3 Parámetros de fabricación.

Se fabricaron probetas por la técnica de fusión por cama de polvo variando diferentes parámetros pero los más importantes son los del interior de la probeta, donde la potencia del láser fue de 370 W, la velocidad del láser fue de 800 mm/s, el espaciado entre cordones fue de 0,12 mm, el diámetro del láser fue de 135 μm , en la Figura 9 se pueden observar los diferentes parámetros que componen la probeta.

Figura 9. Parámetros del cuerpo de cada probeta.



Fuente: elaboración propia.

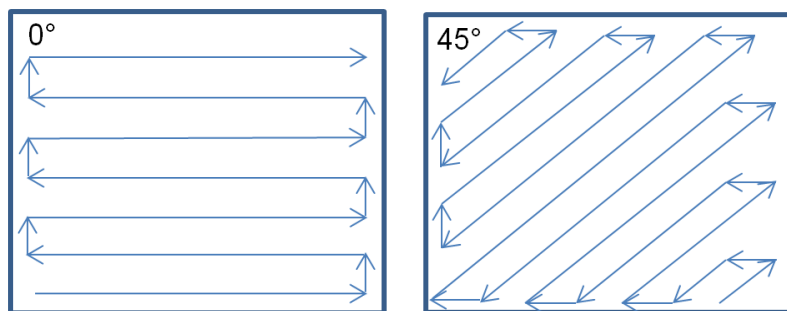
En la Tabla 13 se observa más a detalle los diferentes parámetros utilizados en la fabricación, el parámetro 5 se utilizó para la base de la probeta, el 3 es el más importante porque fue utilizado para la fabricación del cuerpo o interior y los otros tres parámetros son superficiales.

Tabla 13. Parámetros de fabricación.

# parámetro	Potencia (W)	Velocidad de escaneo (mm/s)	Distancia entre trazos [mm]	Diámetro del láser [μm]
5	200	1100	0,085	135
3	370	800	0,12	135
Vino tinto	100	950		50
Rojo	200	1100	0,085	135
Negro	100	350		50

Además, el ángulo de fabricación de las probetas para 1, 2 y 4 fue de 0° y para 3, 5 y 12 el ángulo de fabricación fue de 45°, en la Figura 10 a continuación se puede observar, como es el movimiento del láser para cada ángulo respectivamente.

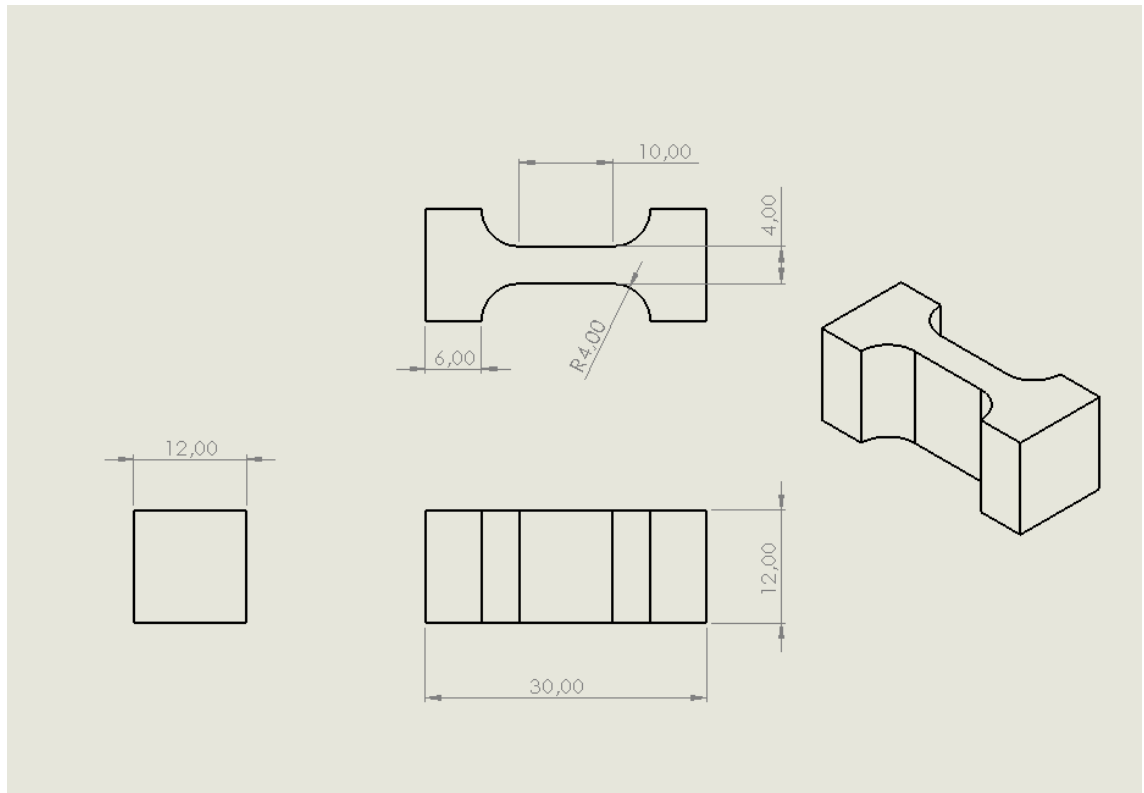
Figura 10. Movimiento del láser.



Fuente: elaboración propia.

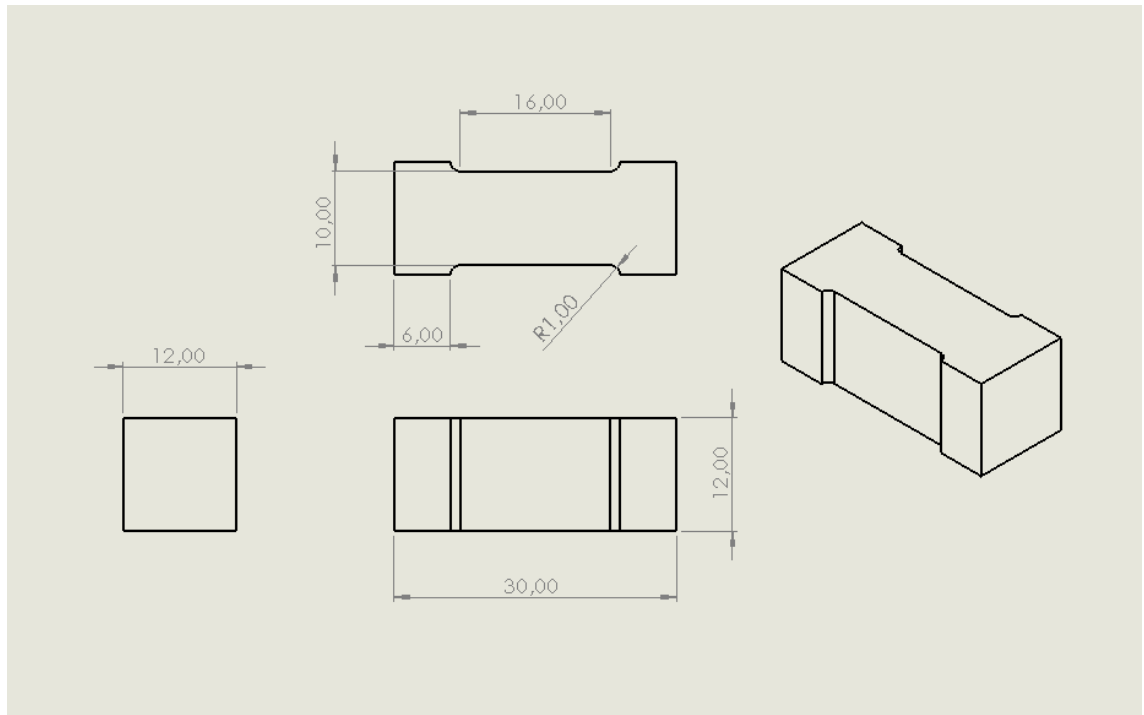
Las dimensiones de las probetas se observan en los planos, las fabricaciones de las seis probetas tiene tres geometrías diferentes; es decir, que la 2 y 3 comparten la misma geometría de 4 mm de ancho y radio de 4 mm (Figura 11), la 5 y la 1 tiene ancho 10 mm y radio 1 mm (Figura 12) y por último la 4 y la 12 son de ancho 7 mm y radio 2,5 mm (Figura 13), se siguió la metodología de la norma E8 para probetas para ensayo de tensión.

Figura 11. Medidas de la probeta de radio 4 mm.



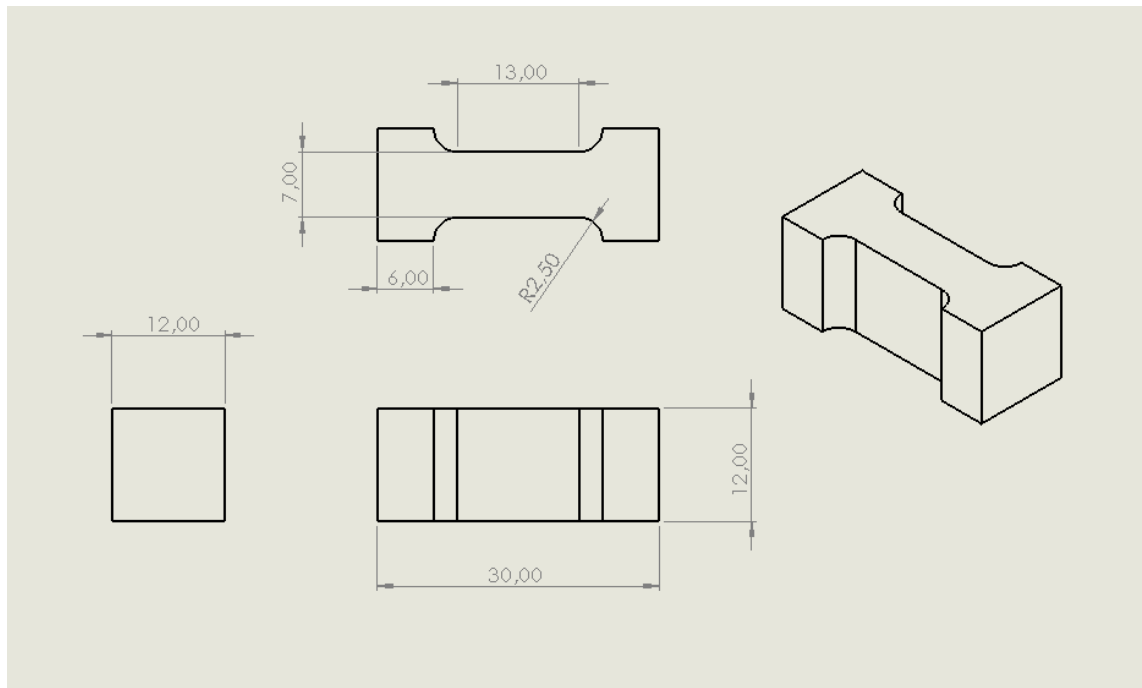
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Medidas de la probeta radio 1 mm.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Medidas de la probeta de radio 2,5 mm.

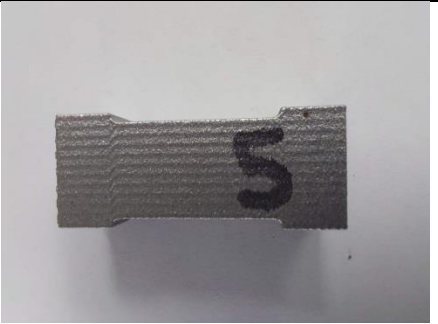


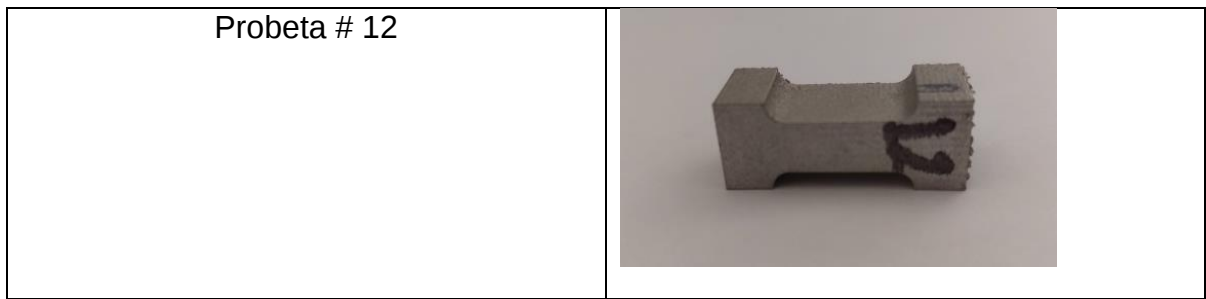
Fuente: elaboración propia.

Después de la fabricación se obtuvieron seis piezas como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Probetas fabricadas.

Probeta # 1	
--------------------	--

Probeta # 2	
Probeta # 3	
Probeta # 4	
Probeta # 5	



Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Ensayo de tensión experimental.

5.2.2.1 Corte.

Para realizar los ensayos de tensión, primero se cortaron las probetas fabricadas por cama de polvo para tener varias rodajas de 1 mm de espesor aproximadamente, el disco que se utilizó para los cortes de las seis probetas, fue un disco de diamante de 12 x 0,4 x 12,7 mm de la marca Struers, en una cortadora Accutom-100 con una velocidad de 0,015 mm/s a 2500 rpm (Figura 14).

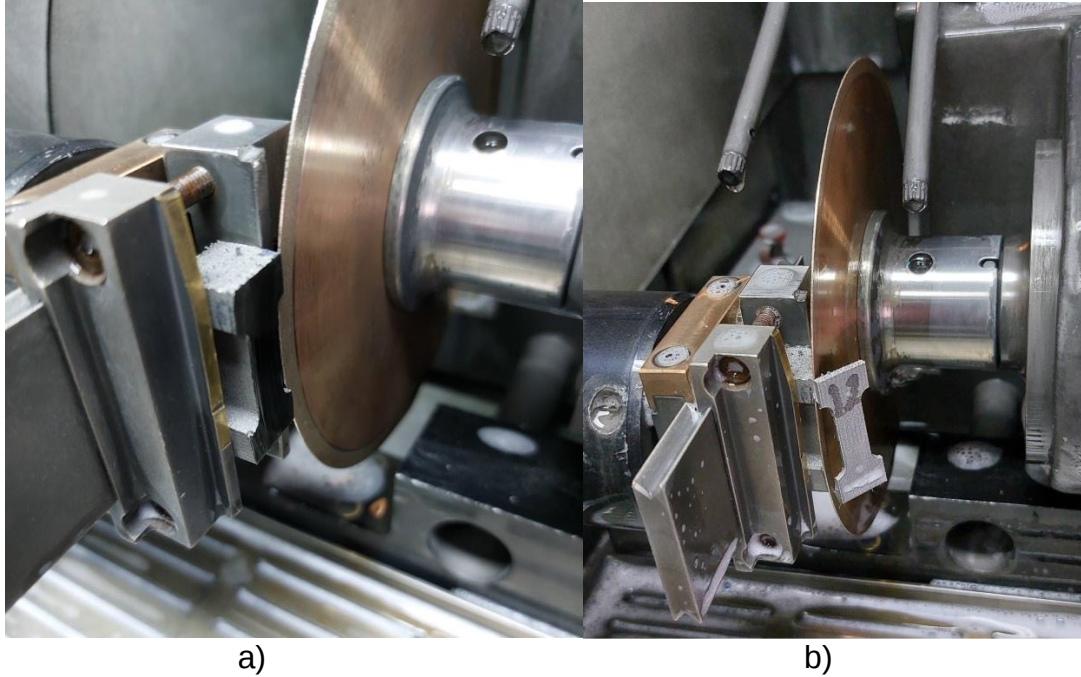
Figura 14. Máquina cortadora.



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente Figura 15, se muestra el corte de las probetas con el disco de diamante, donde por cada pieza se demoró aproximadamente 30 min, para cortarla en su totalidad.

Figura 15. Corte de las probetas a) empezando el corte, b) terminado el corte.



Fuente: elaboración propia.

Al final se obtuvieron dos rodajas por cada probeta, como se ve en la Figura 16; el cual, solo se utilizó la segunda rodaja que es la lisa para el ensayo de tensión.

Figura 16. Diferentes probetas a) los cortes que se realizaron b) probeta de 1 mm de espesor.



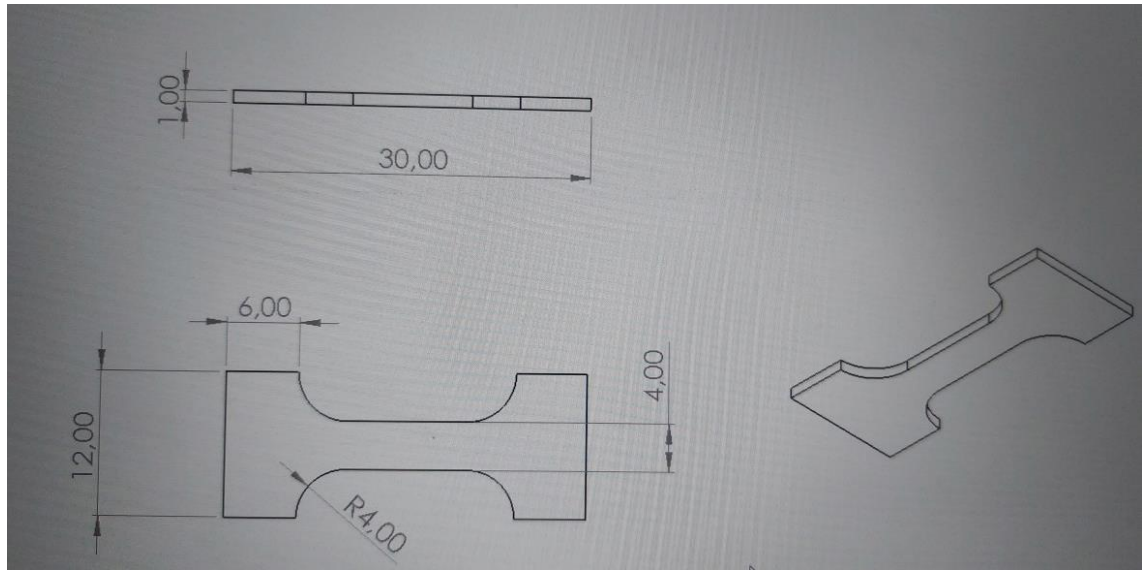
a)

b)

Fuente: elaboración propia.

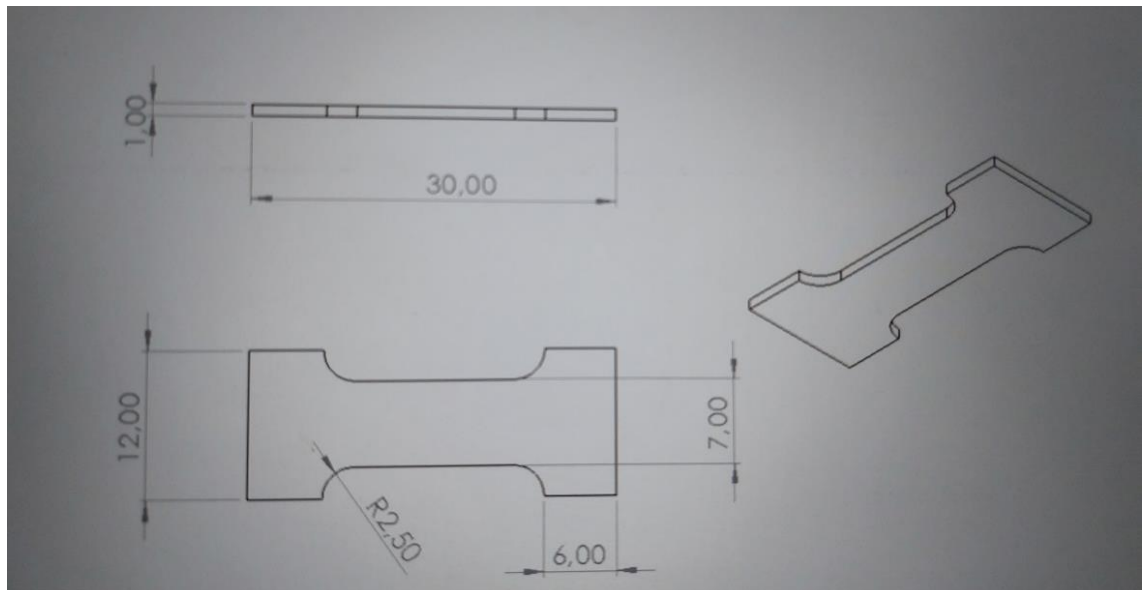
Las dimensiones que se obtuvieron después del corte se pueden observar en las siguientes Figura 17, Figura 18, Figura 19.

Figura 17. Probeta de radio 4 mm con espesor 1mm.



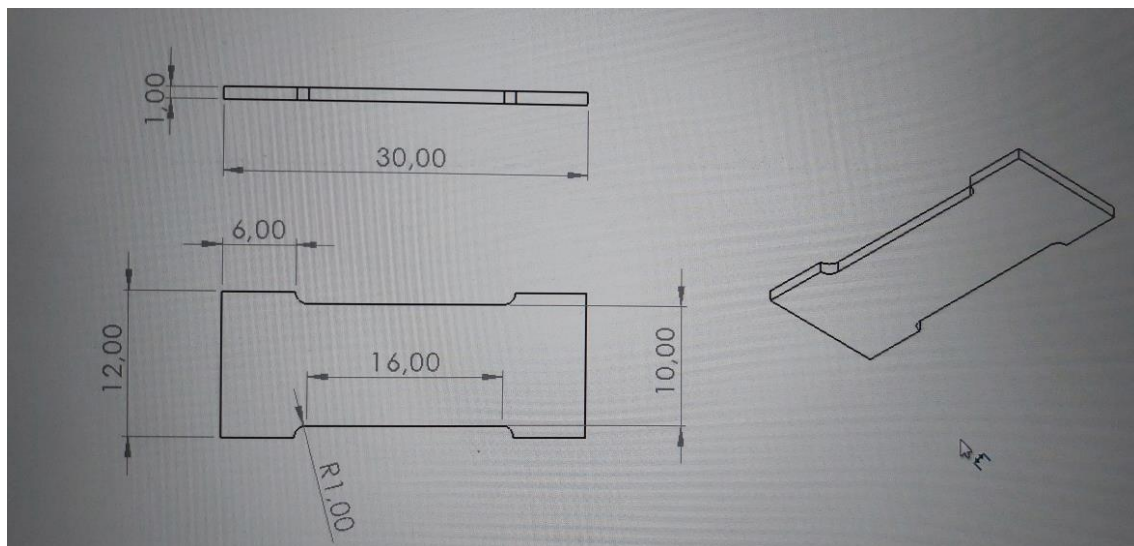
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Probeta de radio 2,5 mm con espesor 1mm.



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Probeta de radio 1 mm con espesor 1mm.



Fuente: elaboración propia.

5.2.2.2 Medidas de las probetas.

Luego de cortar las probetas, se midieron manualmente tres veces el ancho y el espesor con un calibrador digital, para sacar un promedio y se registraron en la Tabla 15.

Tabla 15. Medidas de las probetas.

Medidas Probeta								
	Ancho (mm)				Espesor (mm)			
	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.
2	4,21	4,14	4,15	4,167	1,56	1,55	1,56	1,557
3	4,17	4,14	4,17	4,160	1,03	0,99	0,98	1,000
4	7,24	7,15	7,15	7,180	1,55	1,52	1,5	1,523
5	10,07	10,13	10,09	10,097	1,77	1,77	1,77	1,770
12	7,16	7,25	7,28	7,230	1,14	1,06	1,01	1,070
n/a	10,11	10,08	10,1	10,097	1,41	1,4	1,41	1,407

Además, se obtuvo el área con el promedio del Ancho * promedio del Espesor de cada probeta como se observa en la Tabla 16.

Tabla 16. Área calculada de las probetas.

Área		
2	6,486	mm ²
3	4,160	mm ²
4	10,938	mm ²
5	17,871	mm ²
12	7,736	mm ²
n/a	14,203	mm ²

La longitud calibrada para los ensayos experimentales de tensión para cada probeta se muestra a continuación en la Tabla 17, estas medidas se utilizan para calcular la deformación de cada una.

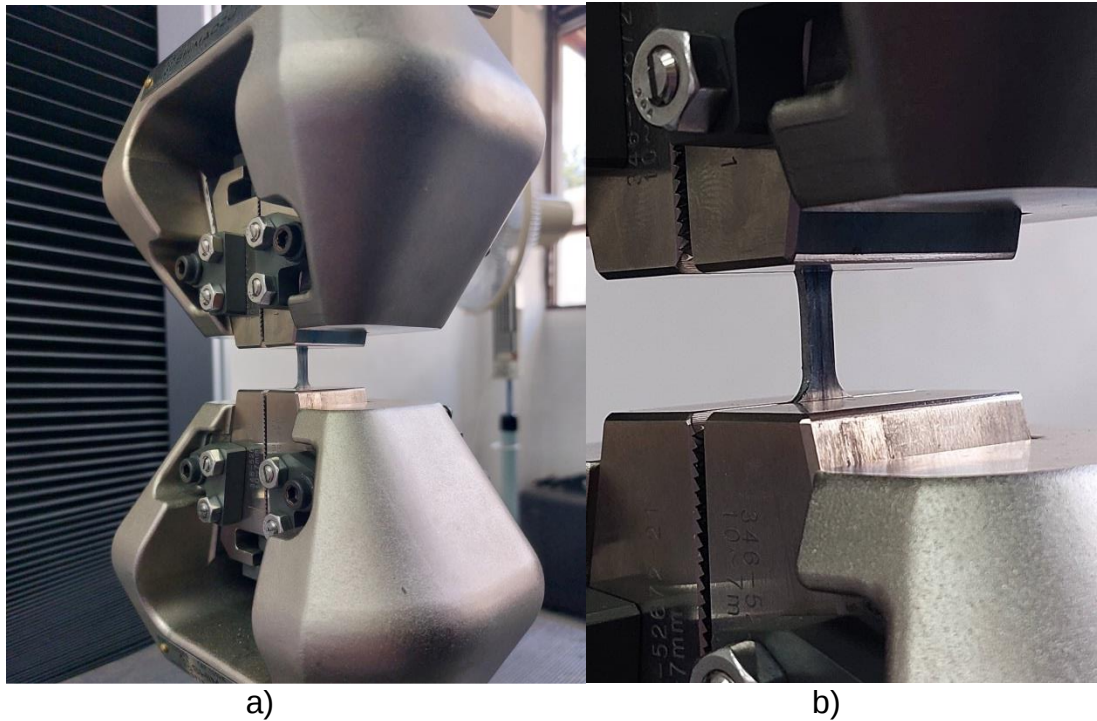
Tabla 17. Longitud calibra del ensayo experimental.

muestra 2	lo	15,35	mm
muestra 3	lo	13,61	mm
muestra 4	lo	13,66	mm
muestra 5	lo	13,34	mm
muestra 12	lo	14,38	mm
muestra n/a	lo	12,78	mm

5.2.2.3 Ensayo de tensión.

En el ensayo de tensión experimental, primero se buscó la mitad a cada probeta, para que quedaran centradas en las mordazas, luego se montó la pieza en la máquina universal con ambiente controlado observado en la Figura 20 y procedió a realizar el ensayo aplicando carga hasta que se fracturo la probeta, esto se hizo con cada una; cabe aclarar, que solo realizo un ensayo de tensión por cada probeta, por el costo que tiene todo el proceso, desde la fabricación hasta los ensayos.

Figura 20. Ensayo de tensión a) probeta en la máquina, b) posicionamiento correcto de las mordazas.



Fuente: elaboración propia.

Para graficar los datos obtenidos en el ensayo experimental de tensión, primero se calcula el esfuerzo con la siguiente ecuación 2.

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (2)$$

Donde,

σ es el esfuerzo.

F es la fuerza.

A_o es el área transversal de la probeta.

Y la deformación es como se observa en la ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_o} \quad (3)$$

Donde,

ε es la deformación.

ΔL es la diferencia de longitud.

l_o es la longitud calibrada.

El método de compensación (offset), se utiliza para determinar el límite elástico (yield strength), este método offset = 0,2%; es decir, se debe sacar una paralela de la pendiente al 0,2% según norma ASTM E8 como se ve en la Figura 70 de Anexo 1 y para obtener el módulo elástico se utilizó el método de la secante.

5.3 SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA

La AM tiene varias técnicas de fabricación de piezas metálicas, pero el software ANSYS solo se enfoca en la fusión por cama de polvo y la deposición de energía dirigida; los cuales, puede producir productos sin porosidad; es decir, totalmente densos. Pero como estos procesos utilizan altas temperaturas para fundir el metal, se generan diferentes problemas como distorsiones y tensiones durante la fabricación de la pieza.

La simulación para la manufactura aditiva, será capaz de ayudar a prevenir los fallos y mejorar los diseños antes de la fabricación de componentes metálicos; además, de determinar cuál es la mejor orientación de construcción de una pieza y su soporte.

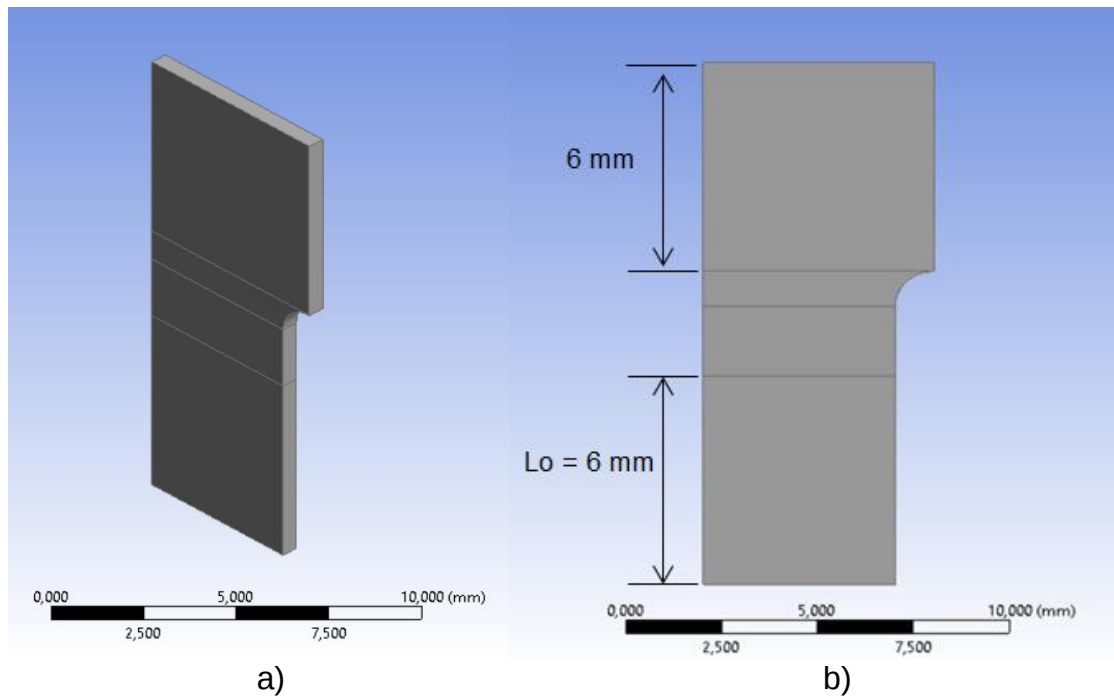
5.3.1 Características del ordenador.

Se necesita un ordenador de alta capacidad y procesador, puede ser desde un Intel i5 en adelante, con disco sólido mayor a 8 Gb de RAM (se recomienda que sea de 16 Gb) de última generación. La computadora utilizada para las simulaciones fue un Intel Xeon W-2145 con RAM de 64 GB y 8 núcleos.

5.3.2 Simulación de ensayo de tensión.

Para simular los ensayos de tensión de las probetas, se utilizó el Workbench de Ansys en el módulo de Static Structural por el método de elementos finitos; primero se construyó 1/8 de probeta (Figura 21); es decir, se creó sola la mitad del largo y del ancho de la probeta, porque con esto se puede trabajar con simetría, para obtener una mejor malla y resultados más exactos.

Figura 21. 1/8 de probeta simulada.



Fuente: elaboración propia.

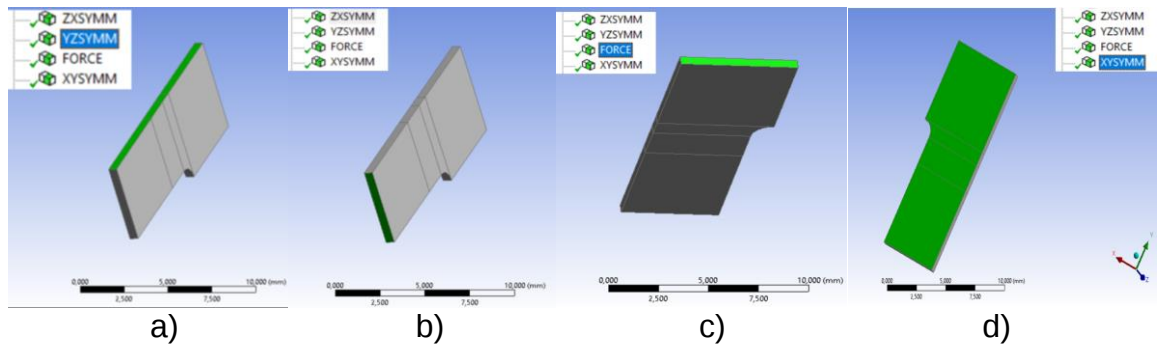
Las líneas que se observan en la Figura 21, son para refinar la malla y en especial Lo que es la longitud calibrada (Tabla 18), es donde se midió la deformación de la probeta.

Tabla 18. Longitud calibrada en la simulación.

Probeta	Lo
2	4 mm
3	4 mm
4	6 mm
5	6 mm
12	6 mm
1	6 mm

Luego de la creación del 1/8 de probeta, se le dio nombre a las caras de la simetría y donde va la fuerza como se observa en la Figura 22.

Figura 22. Nombre de las caras a) cara en YZ, b) cara en ZX, c) fuerza, d) cara en XY



Fuente: elaboración propia.

Después se pasó a la librería de Ansys y se creó un nuevo material, para las diferentes probetas se introdujo las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tensión experimental, como es el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y resistencia última a la tracción como se muestra en la Figura 23.

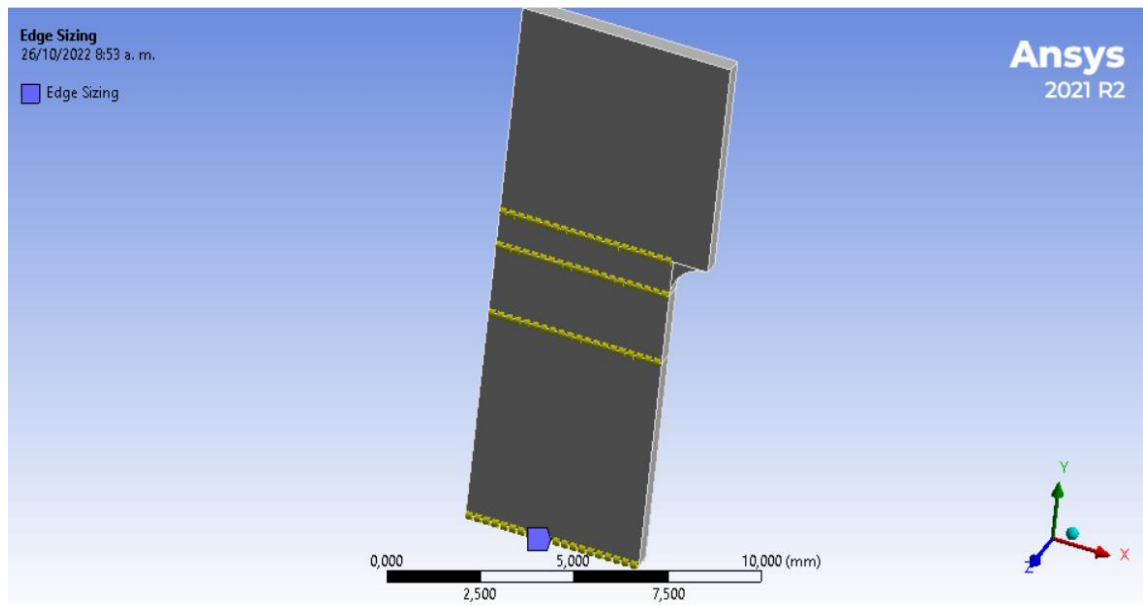
Figura 23. Propiedades del material.

Properties of Outline Row 3: 17-4PH_5			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus ...	
5	Young's Modulus	4,195E+09	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	3,4958E+09	Pa
8	Shear Modulus	1,6135E+09	Pa
9	Tensile Yield Strength	8,7243E+08	Pa
10	Tensile Ultimate Strength	9,07E+08	Pa

Fuente: elaboración propia.

Lo siguiente es realizar la malla, el parámetro empleado en este fue al ancho de la probeta por el número de divisiones que fue de 20; se realizó un Edge sizing en cada uno de los bordes para que quedara bien definida y refinada, el primer sizing se le aplico a los 8 bordes horizontales como se muestra en la Figura 24, y el tipo de malla fue por número de divisiones que fueron 20 para todas las probetas.

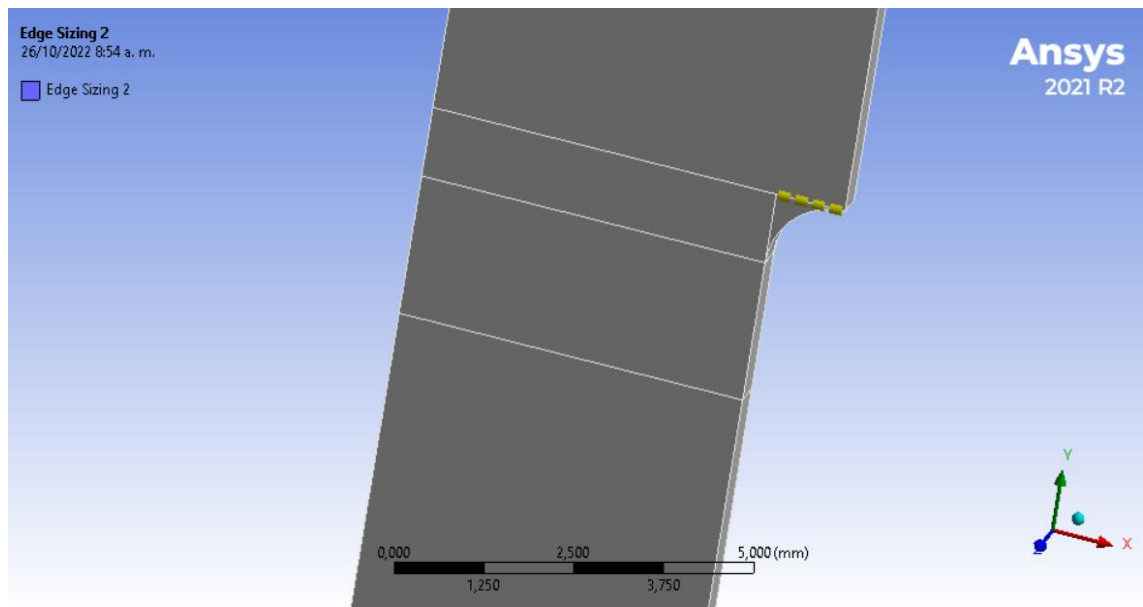
Figura 24. Edge Sizing bordes horizontales.



Fuente: elaboración propia.

El segundo Edge sizing fue aplicado en los dos bordes horizontales del arco de la probeta como se observa en la Figura 25, el tipo de malla fue por tamaño del elemento, el cual fue de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm.

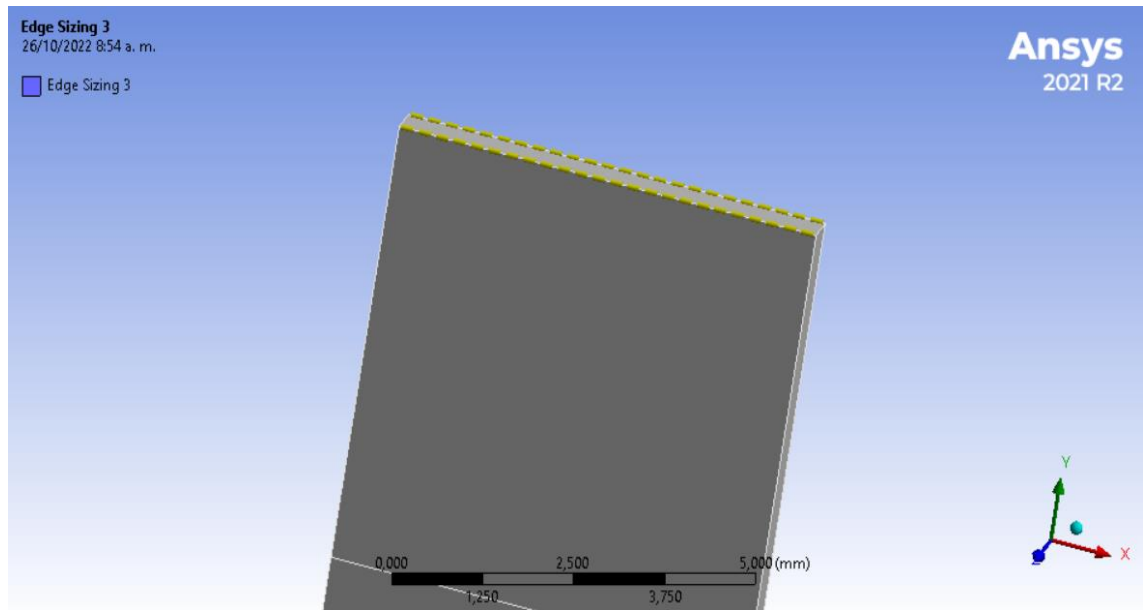
Figura 25. Edge Sizing borde horizontal del radio.



Fuente: elaboración propia.

El tercer Edge sizing es el de los dos bordes superiores horizontales, con un tamaño de elemento de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm, como se muestra en la Figura 26, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4 mm fue de 0,1 mm.

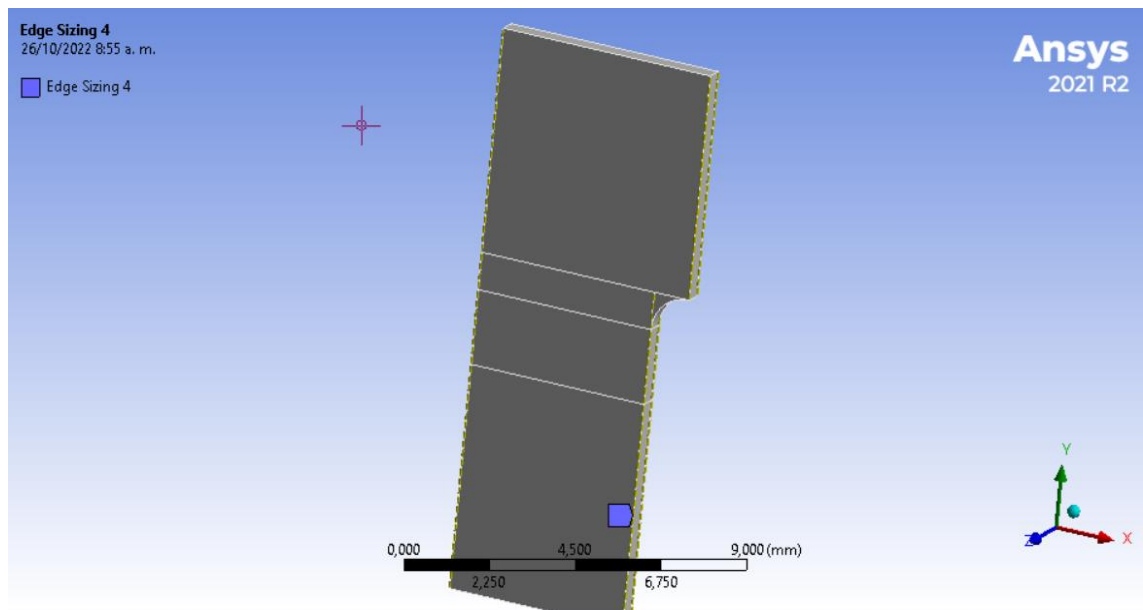
Figura 26. Edge Sizing borde horizontal de arriba.



Fuente: elaboración propia.

El cuarto Edge sizing se empleó en todos los bordes verticales, los cuales fueron 16 en total, con un tamaño de elemento igual que los anteriores de 0,25 mm para las probetas de radio 1 mm como se observa en la siguiente Figura 27, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm.

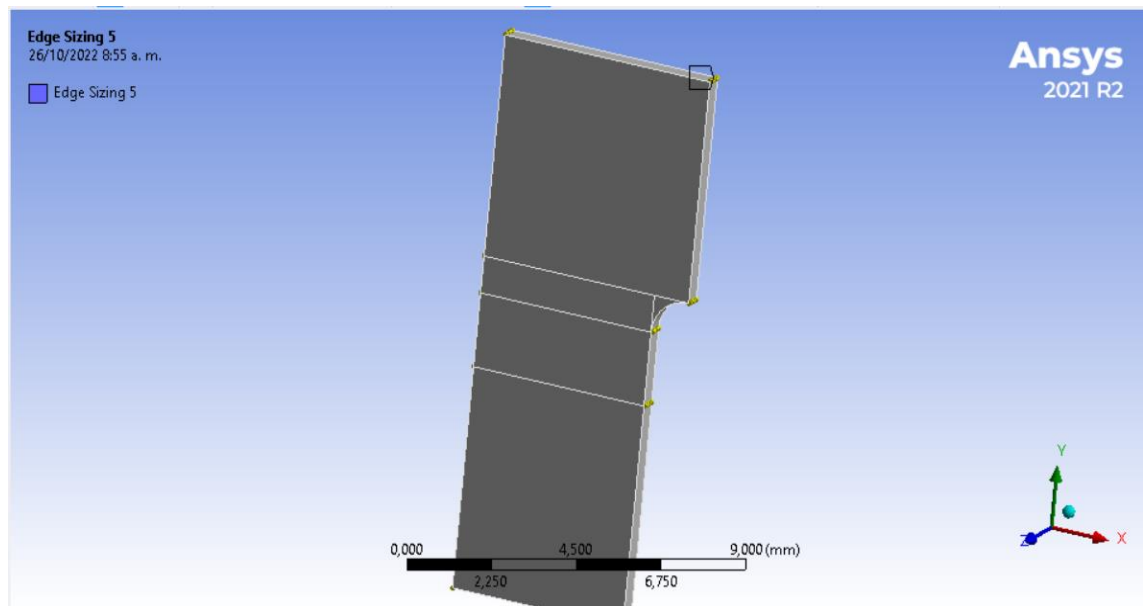
Figura 27. Edge Sizing en los bordes verticales.



Fuente: elaboración propia.

En el quinto Edge sizing se aplicó a los 10 bordes horizontales del espesor, con un número de divisiones de 4 para todas las probetas como en la Figura 28.

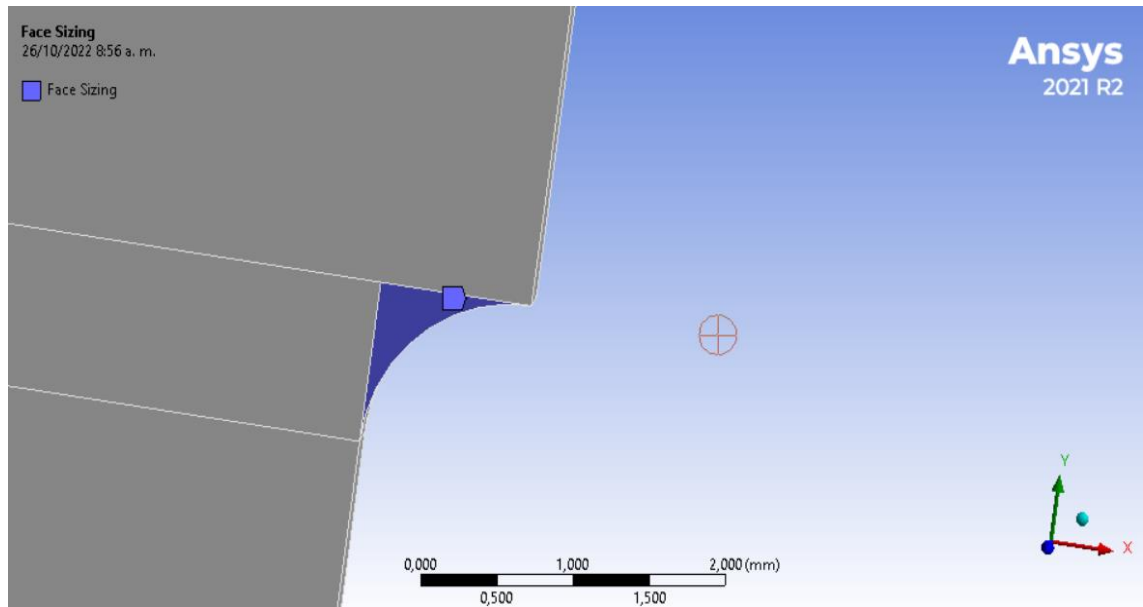
Figura 28. Edge Sizing bordes horizontales del espesor.



Fuente: elaboración propia.

Se realizó un Face sizing, a la parte del triángulo del radio, con un tamaño de elemento de 0,25 mm, para las probetas de radio 1 mm como se observa en la siguiente Figura 29, para las de radios 2,5 mm fue de 0,175 mm y para las de radio 4mm fue de 0,1 mm.

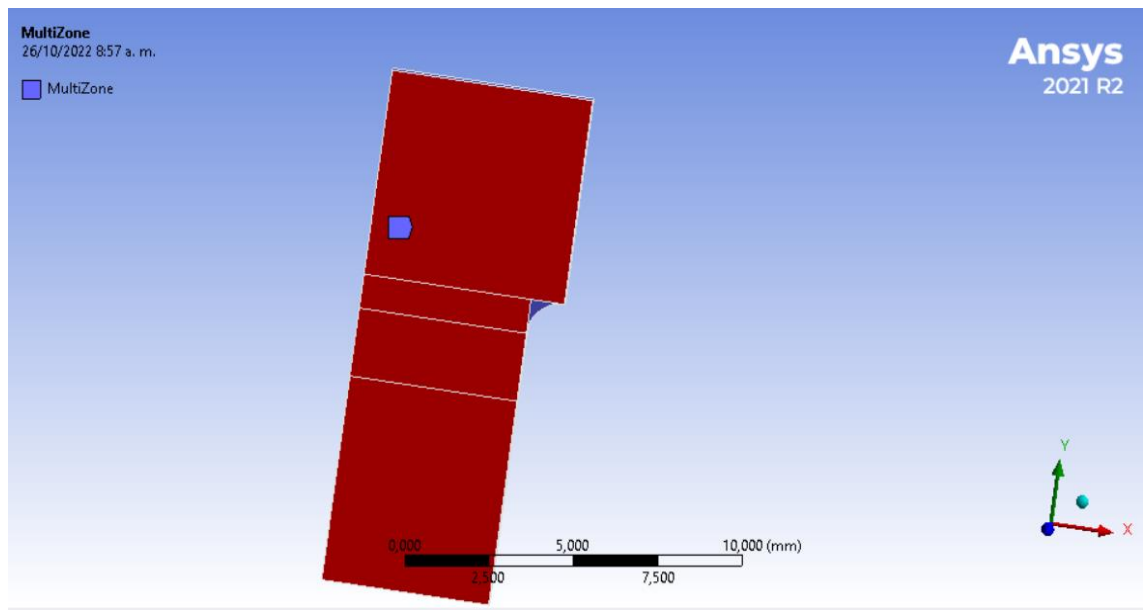
Figura 29. Face Sizing en la superficie del radio.



Fuente: elaboración propia.

Por último en las condiciones de la malla, se realizó un método de tipo Multizona en todo el cuerpo, con malla tipo Hexa, seleccionando las ocho caras de forma manual, que se pueden observar en la Figura 30 de color rojo; es decir, se seleccionaron todas, menos el triángulo del radio.

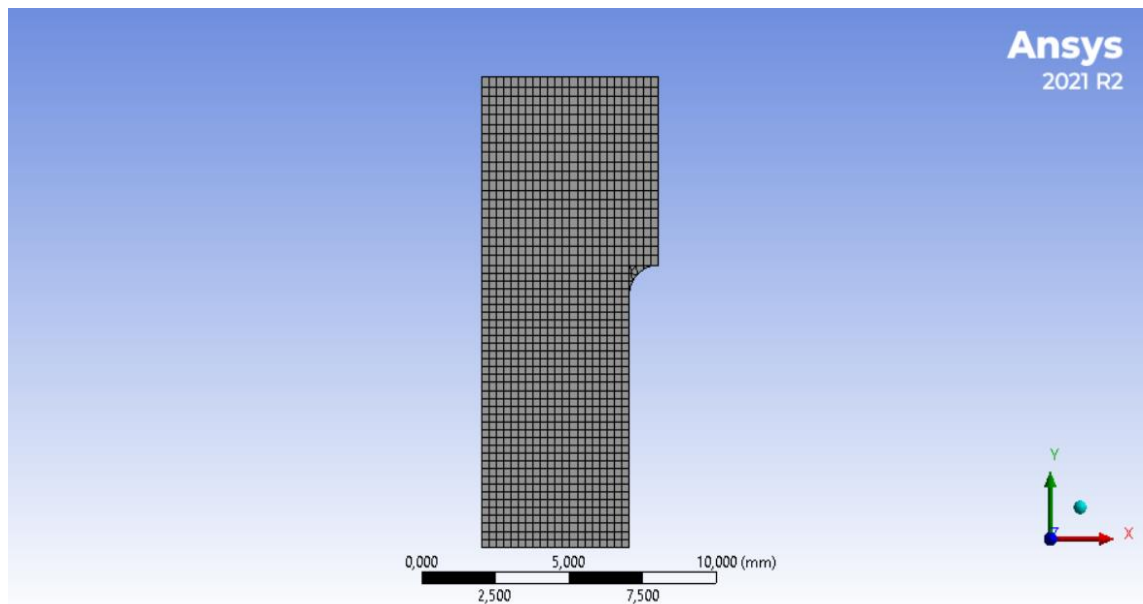
Figura 30. Método de MultiZone.



Fuente: elaboración propia.

Como resultado se tuvo una malla triangular con el máximo refinamiento como se puede ver en la Figura 31.

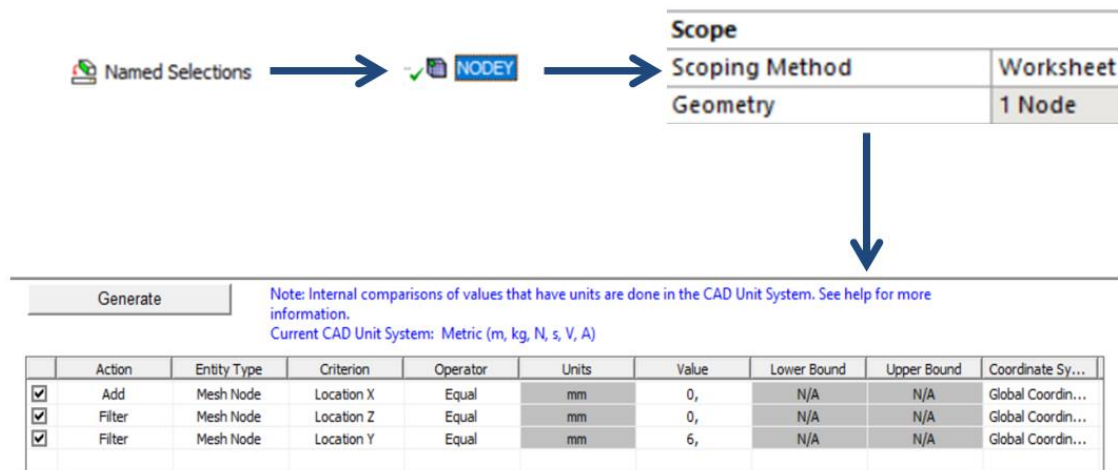
Figura 31. Malla de la simulación.



Fuente: elaboración propia.

Luego de realizar el mallado en 1/8 de probeta, se pasó a especificar el nodo donde se midió la deformación; en la parte Named Selections se crea uno nuevo llamado “NODEY”, donde se especifica que el método sea Worksheet, luego de especificarlo se abre una ventana donde se pondrán parámetros para filtrar y encontrar el nodo mostrado en la Figura 32; el cual va a estar en la distancia calibrada (Lo) de altura y en la mitad del ancho, para que no cambien el área al aplicar el desplazamiento.

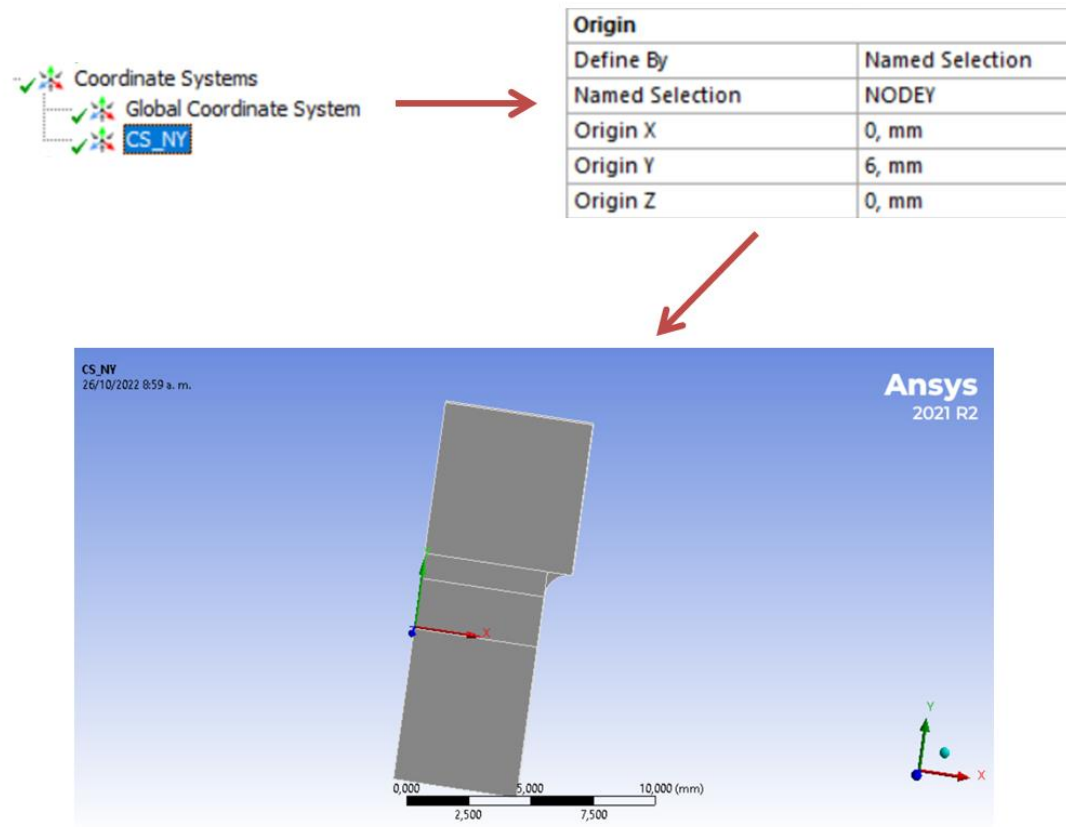
Figura 32. Pasos para la creación del nodo.



Fuente: elaboración propia.

Luego de esto, se creo un sistema de coordenadas en el nodo específico; el cual, se nombro “CS_NY”; es decir, al crear un nuevo sistema de cordenadas se especifico que el origen fuera en el Named Selecton “NODEY” como se esfecifica en la Figura 33.

Figura 33. Pasos para la creación del sistema de coordenadas.



Fuente: elaboración propia.

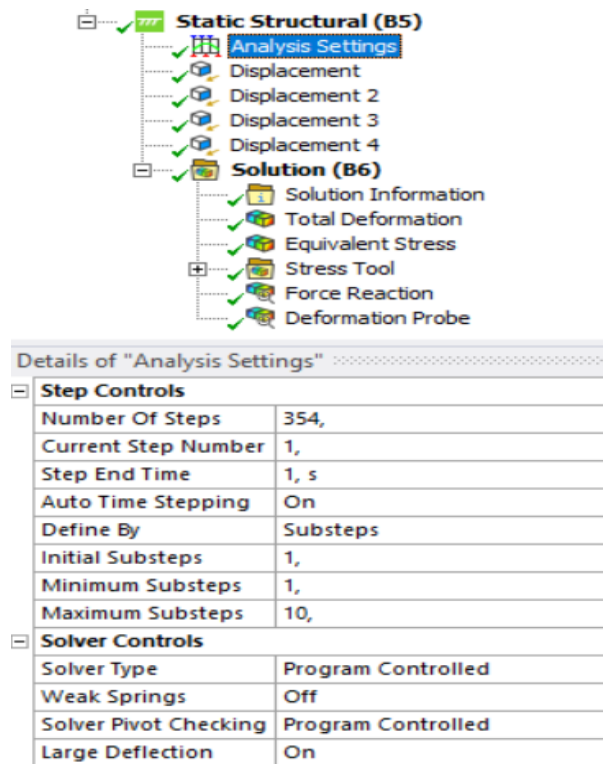
Luego del nuevo sistema de coordenadas, se pasó al parámetro de Static Structural, primero en Analysis Settings se colocó el tiempo que duro el ensayo de tensión experimental, que varía en cada probeta como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Tiempo y desplazamiento de cada probeta en el ensayo experimental.

Probeta	Tiempo (s)	Desplazamiento Máximo (mm)
# 2	195	3,256325
# 3	150	2,502767
# 4	267	4,454975
# 5	354	5,898592
# 12	206	3,434042
# 1	287	4,793475

En el caso de la Figura 34 fue de 354 segundos; además, debe estar activado el parámetro “Large Deflection” para que la simulación sea exitosa.

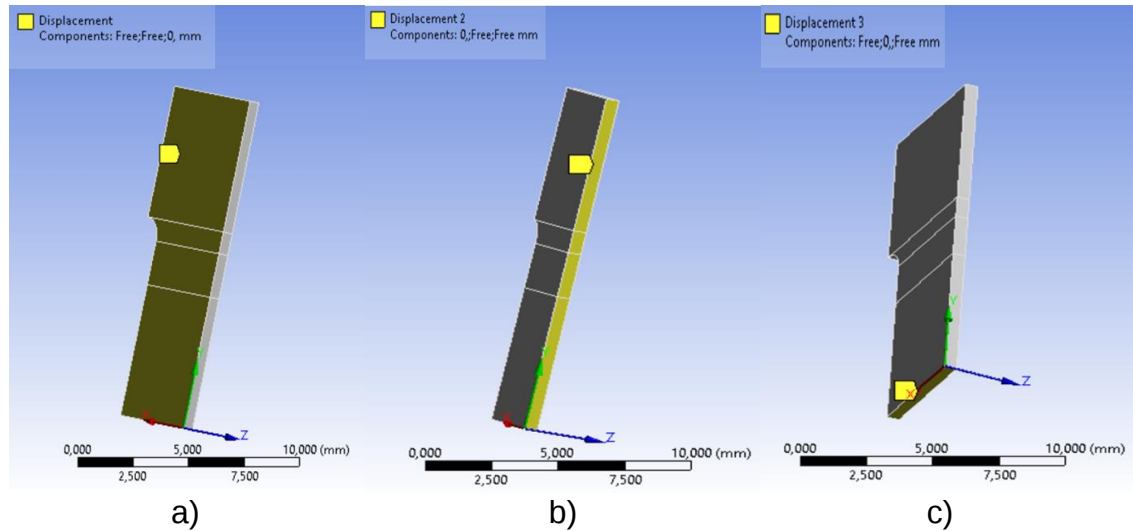
Figura 34. Analysis Settings.



Fuente: elaboración propia.

Se fijaron cuatro desplazamientos, de los cuales 3 son para fijar las caras de la simetría: el primer desplazamiento tiene cero movimiento Z y libre el eje X y Y, el segundo desplazamiento tiene cero movimiento en X y libre en Y y Z, el tercer desplazamiento tiene cero movimiento en Y y es libre en X y Z como se observa en la siguiente Figura 35.

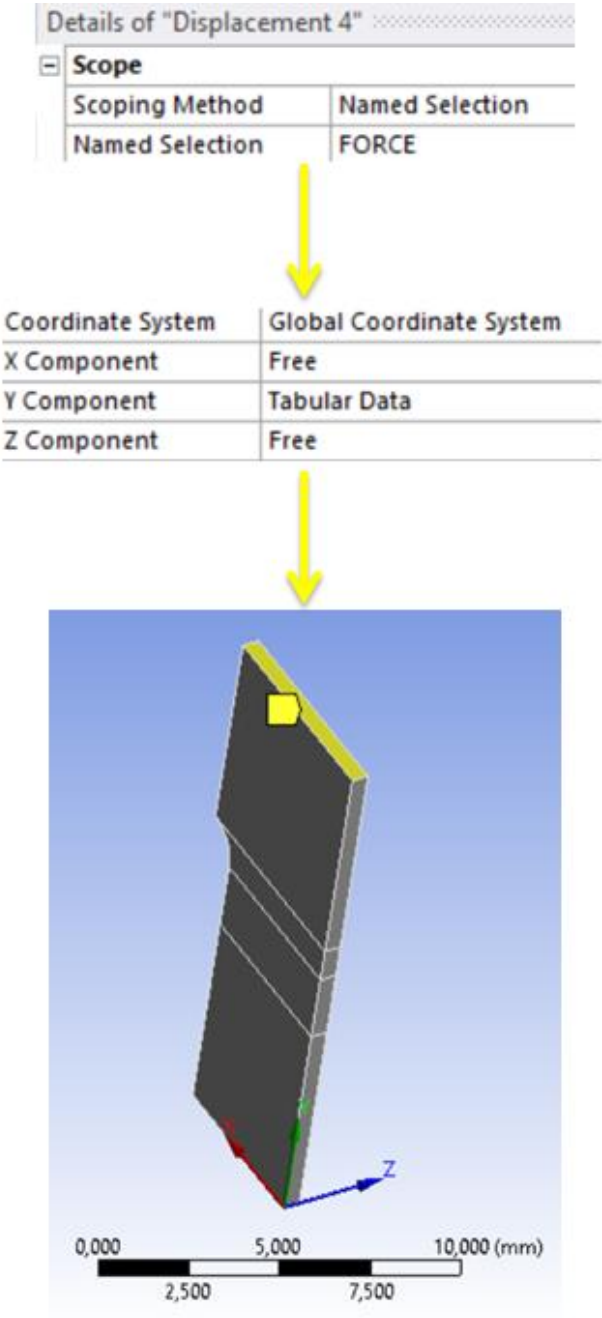
Figura 35. Desplazamientos.



Fuente: elaboración propia.

El último desplazamiento aplicado es el de la fuerza, donde se debe seleccionar es el nombre de la fuerza (FORCE) y no la cara para una mejor simulación, luego como el desplazamiento se efectúa en la coordenada Y, a esta se le da en tabular datos como se observa en la Figura 36, por último saldrá una tabla con el tiempo ajustado anteriormente en el cual, para el último tiempo se utilizó la mitad del valor máximo de desplazamiento de cada probeta de la Tabla 19, se coloca solo la mitad, ya que solo se está simulando la mitad de la probeta.

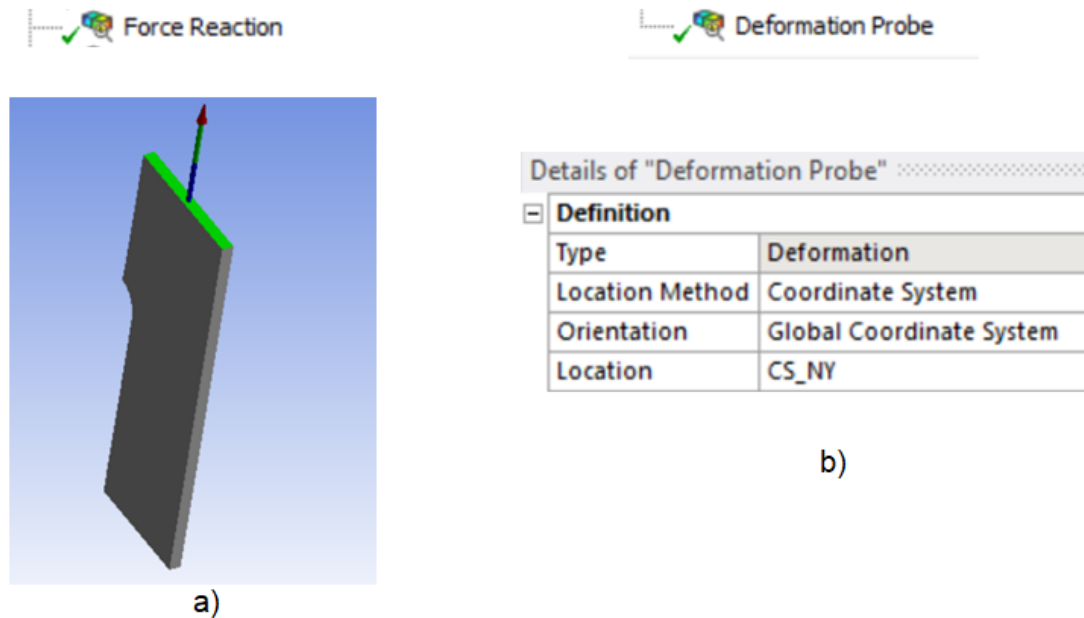
Figura 36. Pasos del desplazamiento 4.



Fuente: elaboración propia.

Por último, en resultados se llama la variable Force Reaction aplicada en el desplazamiento 4 y la Deformation Probe aplicada en el sistema de coordenadas llamado CS_NY como se observa en la Figura 37.

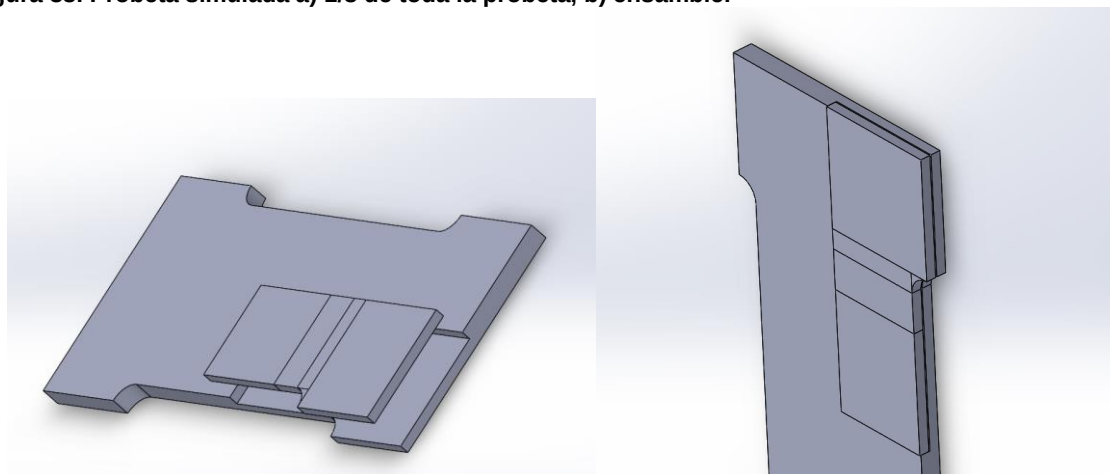
Figura 37. Los resultados de la simulación a) fuerza y b) deformación.



Fuente: elaboración propia.

Para calcular el esfuerzo simulado este es cuatro veces la fuerza sobre el área transversal de la probeta porque como se simuló 1/8 de probeta observado en la Figura 38.

Figura 38. Probeta simulada a) 1/8 de toda la probeta, b) ensamble.



a)

b)

Fuente: elaboración propia.

Entonces, se debe multiplicar por cuatro dichas fuerzas y se divide por el total de área calculada de forma experimental, como se observa en la siguiente ecuación 4.

$$\sigma = \frac{4F_s}{A_o} \quad (4)$$

Donde,

F_s es la fuerza en la simulación.

Y la deformación es dos veces la diferencia de longitud dividida por la longitud calibrada de la simulación (gráfica), porque solo se está simulando la mitad, como se muestre en la ecuación 5.

$$\varepsilon = \frac{2\Delta L}{L_o} \quad (5)$$

Donde,

L_o es la longitud calibrada en la simulación.

5.3.3 Simulación de procesos AM en Ansys Workbench.

Workbench Additive está diseñada para trabajar dentro en el Workbench de Ansys; tiene el objetivo de predecir las tensiones y distorsiones que se generan en las piezas, con esto poder evitarlas, mejorando los diseños de los componentes como la orientación de la pieza y el tamaño del soporte.

La malla en capas puede ser de forma tetraedro o cartesiana, esta malla evoluciona en cada capa; es decir, va cambiando y reajustándose con el tiempo a medida que la capa avanza. Simular la fabricación real consumiría mucho tiempo de cómputo, para llegar a óptimos resultados en menor tiempo se utilizan las siguientes formas:

Súper capas: las capas reales con historial de temperatura similares se agrupan en un conjunto llamada “súper capa” de elementos finitos para disminuir el tiempo de simulación.

Adición capa por capa: en esta función se calienta todo el material de toda la capa a la vez; lo que significa que no se utiliza los datos de entrada del patrón de escaneo.

Temperatura aplicada: con este parámetro en vez de utilizar flujo de calor, se usa la temperatura de fusión en toda la capa, suponiendo que la temperatura siempre es constante en la fabricación.

Tamaño de paso de tiempo: se usan tamaños de tiempo grandes en la simulación, lo suficientes para obtener resultados de tensión térmica y distorsiones en la pieza, pero las tasas de enfriamientos no son bien detalladas.

Soporte: los soportes son sólidos ortotrópicos homogéneos, que es lo suficiente para obtener la distorsión en la pieza y las fallas del soporte.

Polvo circundante: el polvo no fundido no necesita ser modelado, pero la pérdida de calor en el material si debe tener una condición de límite de convección entre la cama base y el polvo.

Las propiedades en la simulación de fabricación aditiva con Ansys workbench incluyen:

Tiempo de enfriamiento: esta propiedad se puede usar cuando se utiliza el proceso AM con un sistema térmico transitorio, donde se puede especificar el tiempo con el parámetro Time.

Temperatura de referencia: se puede seleccionar en el Static Structural del proceso AM; donde, incluye la temperatura de fusión, temperatura de ambiente, temperatura de precalentamiento, temperatura del gas utilizado.

En el diseño de fabricación se deben tener en cuenta algunas variables que pueden afectar la calidad y el costo de la pieza, estas pueden ser el diseño del componente como agujeros, bordes, espesor y acabados; también puede ser producto de la estructura de los soportes y por último, la estructura de los soportes que sirven para reducir las deformaciones y estabilizar el componente.

Por otro lado, los soportes son muy importantes en la fabricación aditiva, al simularlos de forma correcta crea una exitosa simulación. En la herramienta de diseño SpaceClaim, en la pestaña Facetas se encuentran varias opciones que ayudan con el modelamiento para la manufactura aditiva, como es la de Voladizo que ayuda a saber dónde se generaran los soportes.

Además, la malla es lo más importante para tener buenos resultados y es crucial saber mallar en capas para la simulación aditiva; por lo tanto existen varios criterios que se deben tener en cuenta para resolver que tipo de técnica de malla utilizar:

- Si la geometría tiene agujeros, curvas o paredes delgadas; es decir, si la pieza es compleja, lo ideal es utilizar una malla de tetraedros.
- Si la geometría es gruesa sin agujeros o si se utilizará soportes generados de forma automática, utilizar una malla cartesiana.

5.3.3.1 Asistente aditivo.

El asistente aditivo es una herramienta para realizar de manera más fácil las simulaciones. Primero se selecciona la pieza, luego el soporte y por último la base; después, se introducen las condiciones del proceso como son la temperatura de precalentamiento, temperatura ambiente, el tipo de gas, la velocidad del láser, el espesor de la capa, entre otros. Además, se debe introducir el tipo de malla, si cartesiana o tetraedros para luego pasar a los contactos de las piezas.

Para activar la extensión de manufactura aditiva primero se debe abrir el Workbench de Ansys, seguido en la parte superior encontrara la pestaña de extensiones en la parte de instalar extensiones, se da clic y posterior se activa la de asistente aditivo, seguido de esto se activara la extensión del sistema de manufactura aditiva, al dar clic se abrirá un análisis térmico y un análisis estructural para la simulación de manufactura aditiva como se muestra en la Figura 39.

Figura 39. Pasos para activar la extensión de AM.

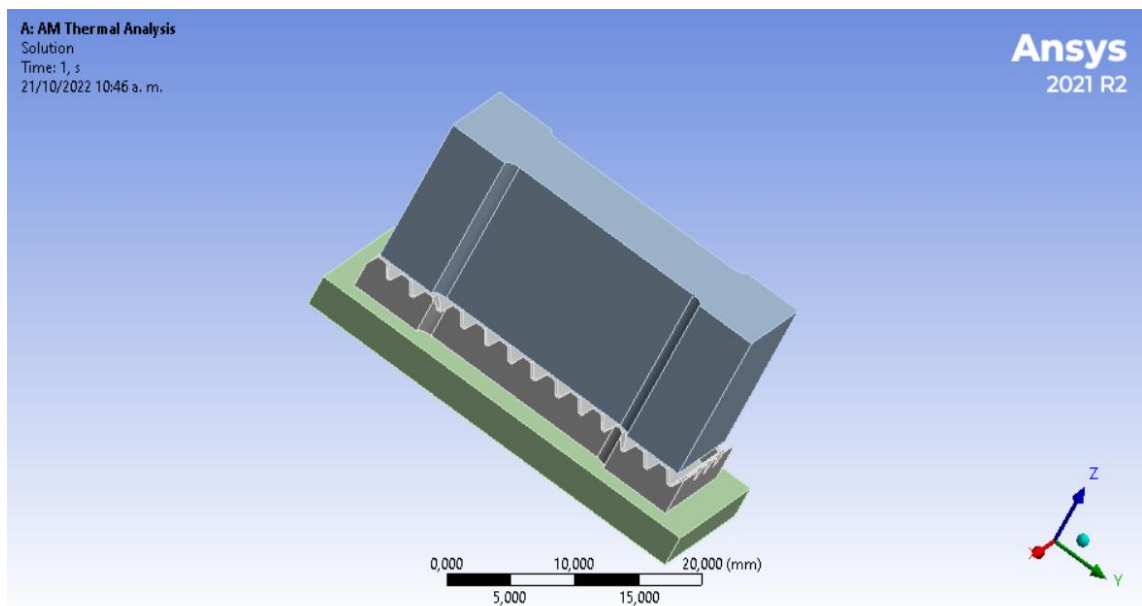


Fuente: elaboración propia.

5.3.3.2 Simulación con soporte predeterminado.

El soporte predefinido consiste en crear el soporte antes de la simulación; es decir, que se crea el CAD para luego simularlo. Este tipo de soporte va entre la pieza construida y la placa base, siempre se construye con extrusión en el eje positivo como se observa en la Figura 40.

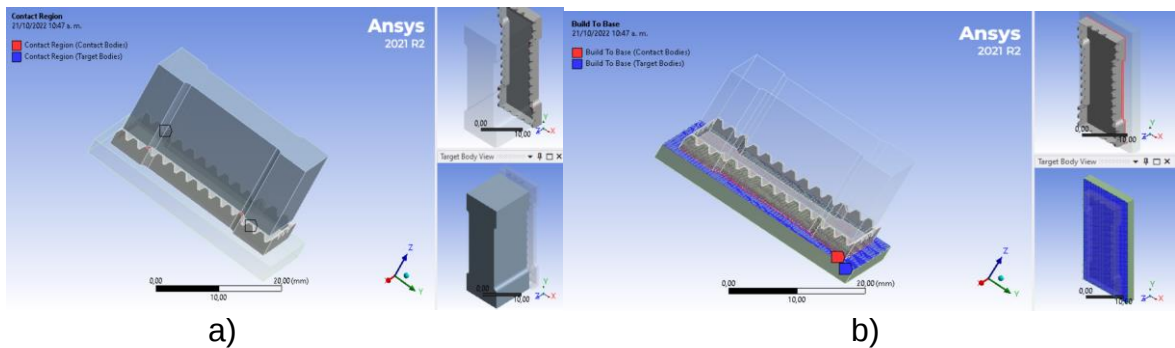
Figura 40. Probeta con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

Luego que se tiene el componente definido se pasa a la simulación con el asistente donde primero se define cada una de las geometrías, cual es la pieza, el soporte y la base; se definieron dos contactos, el primer contacto entre la pieza y el soporte y el segundo entre el soporte y la base como se observa en la Figura 41.

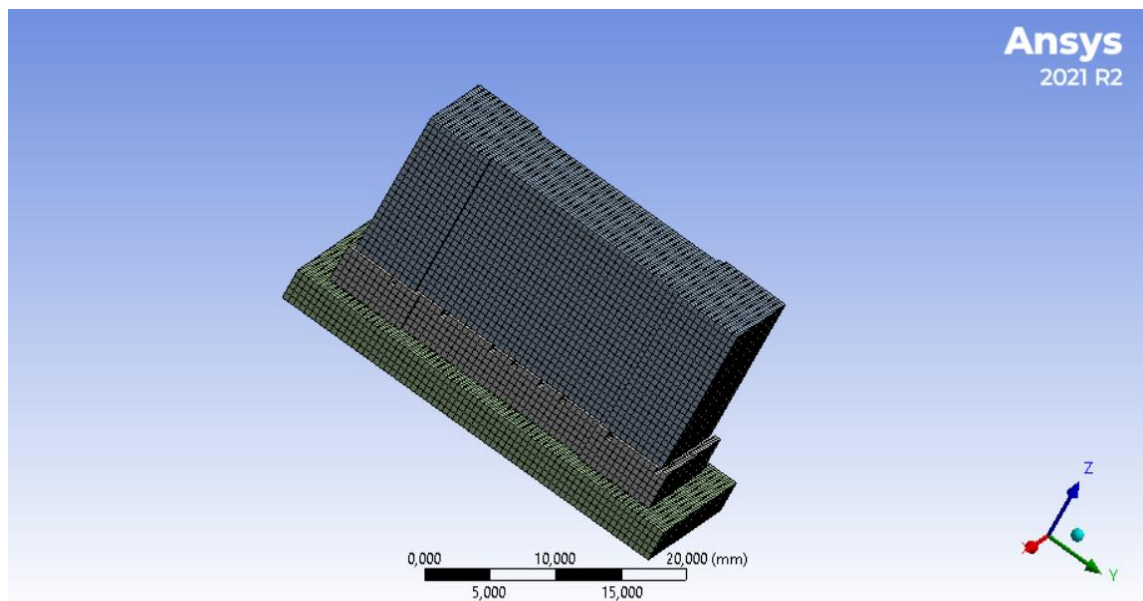
Figura 41. Creación de contactos a) contacto entre la probeta y el soporte, b) contacto entre el soporte y la base.



Fuente: elaboración propia.

Luego se definió la malla, en este caso una malla cartesiana de 0,5 mm como se muestra en la Figura 42.

Figura 42. Malla con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

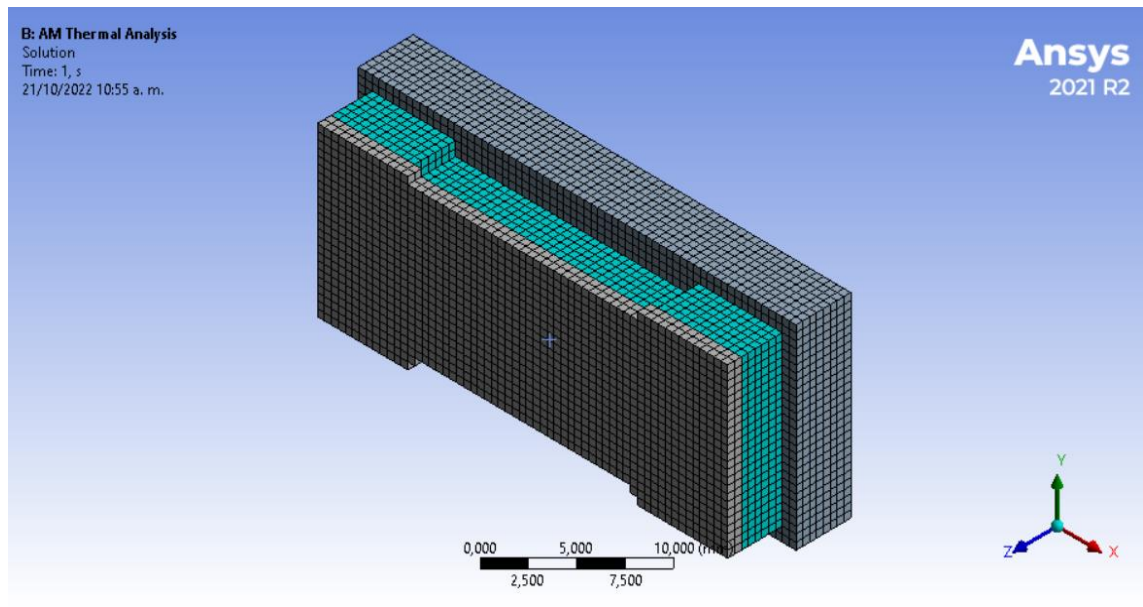
Después se incluyeron los parámetros para el proceso de manufactura aditiva como la altura de la capa que fue de 0,5 mm y la configuración de la máquina como el factor de escala de tensión térmica que es 1, el espesor de deposición es de 0,14 mm, espaciado entre cordones que es de 0,085 mm, velocidad de escaneo 1100 mm/s, número de fuentes de calor igual a 1 y el ángulo de construcción del soporte fue a 45 °C.

Las condiciones de construcción que son la temperatura de precalentamiento igual a 0°C, temperatura de gas/polvo igual a 100 °C, coeficiente de convección de gas 0,00001 W/mm²°C, coeficiente de convección de gas 0,00001 W/mm²°C, coeficiente de convección de polvo 0,00001 W/mm²°C.

5.3.3.3 Simulación con soporte generado.

La simulación de fabricación aditiva con soporte generado (automático) crea una geometría interna de elementos finitos; es decir, este soporte se modela entre la pieza y la palca base como se observa en la Figura 43.

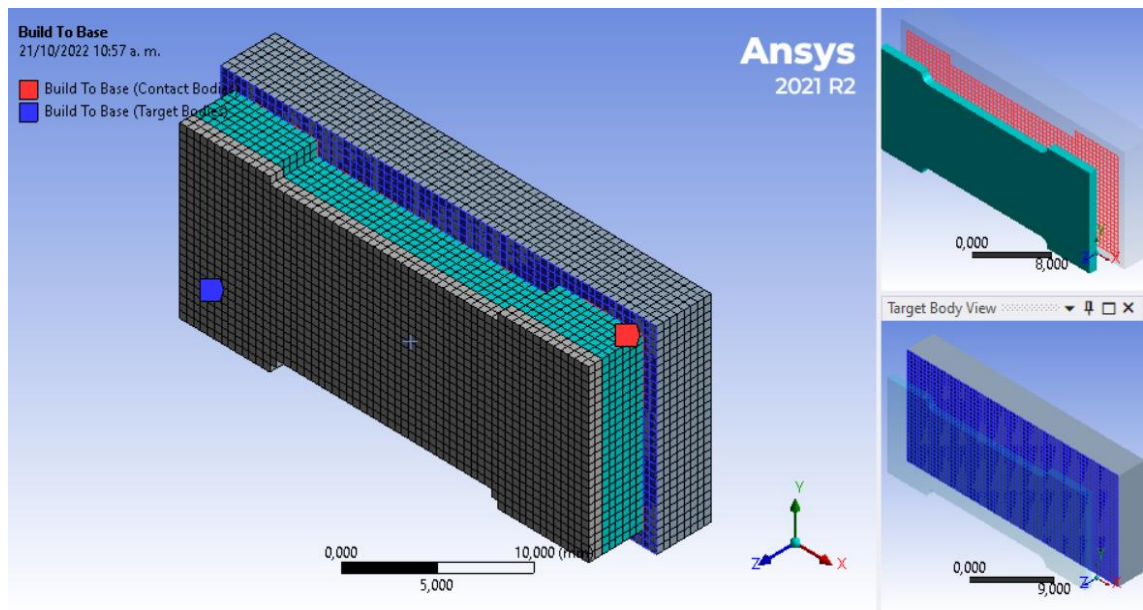
Figura 43. Probeta con soporte automático.



Fuente: elaboración propia.

Se crearon dos condiciones de contacto una para la pieza y otra para la base como se muestra en la siguiente Figura 44.

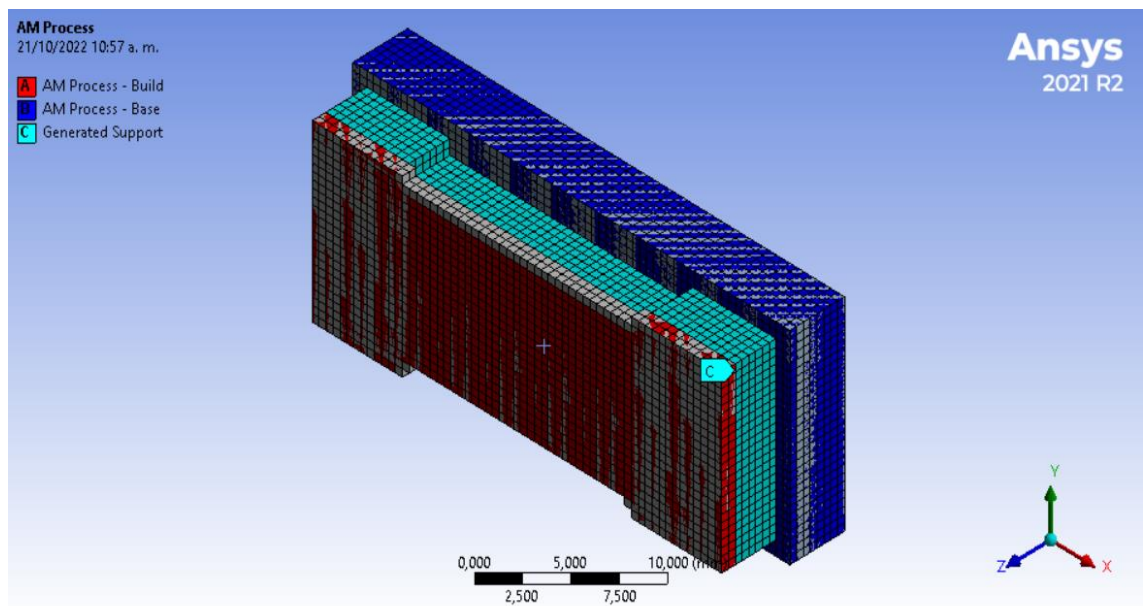
Figura 44. Creación de los contactos.



Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, se obtiene un proceso para la pieza, uno para la base y se genera el soporte que es el azul claro cómo se observa en la Figura 45; el cual, es totalmente exportable para la fabricación experimental; además, tiene las mismas configuraciones de la máquina y parámetros de la simulación anterior.

Figura 45. Generación del soporte automático.

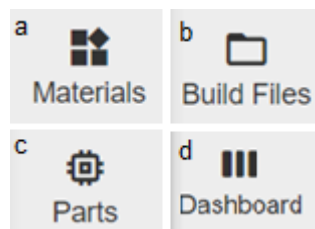


Fuente: elaboración propia.

5.3.4 Simulación en ANSYS Additive

En primer lugar se hace un breve abordaje al entorno de Ansys Additive. En este se muestran cuatro iconos que son usados para programar el proceso de manufactura aditiva. El primero (Figura 46a) se observan los materiales que se pueden utilizar en las diferentes simulaciones, se encuentra el 316L (Beta), Al357, AlSi10Mg, CoCr, IN625, IN718, Ti64 y el 17-4PH. Los diferentes materiales aptos para este tipo de simulaciones pueden ser cargados desde otras bases de datos. Esta investigación utilizó el acero inoxidable 17-4PH.

Figura 46. Iconos fundamentales.



Fuente: elaboración propia.

El segundo icono Figura 46b es el “Build Files” es donde se crean o se importan nuevos archivos y tienen tres requisitos que se explican a continuación: primero debe existir un archivo de extensión de máquina y un archivo de geometría de pieza única (.stl).

El archivo de geometría de la pieza no tiene requisitos de denominación especiales. Las geometrías de la pieza y el soporte deben coincidir con el tamaño, la orientación y la posición de los patrones de escaneo en el archivo de instrucciones de la máquina.

El tercer icono es el de partes, Figura 46c en el cual se importan todas las piezas que se vayan a investigar y a simular, en esta sección se puede observar el volumen total de la pieza en mm³. Por último, el más importante, es el icono del tablero de mandos, Figura 46d donde se procede a realizar la simulación para la MA, en la cual se puede encontrar en Ansys Additive Print.

Este ayuda a minimizar el riesgo y garantizar alta calidad en las piezas, verificar la distorsión, tensión y predecir el choque de la cuchilla, disminuyendo el tiempo del desarrollo del producto y estimando un análisis térmico rápido y detallado.

A continuación, se realizó una práctica aplicando los parámetros que se utilizaron en la metodología para emplear el software en un caso particular; en el cual, se utilizó una probeta estándar de acero 17-4 PH para dichas simulaciones.

5.3.4.1 Simulación de una probeta.

Posteriormente, se tabulan los datos que se tuvieron en cuenta en la simulación de la probeta; en la cual, se realizó una simulación de deformación térmica. Se realizaron seis simulaciones variando la potencia, velocidad, el diámetro del láser y espaciado entre cordones que se encuentran en la Tabla 13, para las tres geometrías de las probetas.

5.3.4.1.1 Datos de entrada.

El material utilizado para la simulación es el acero 17-4PH; como se observa en la Tabla 20, en ella están las propiedades del material que van variando con la geometría y parámetros de fabricación.

Tabla 20. Parámetros de simulación.

Materia:	17-4PH
Modo esfuerzo:	Elástico lineal
Limite elástico:	Depende de la probeta
Modulo elástico:	Depende de la probeta
Radio de Poisson:	0,272
Factor de escala de tensión:	1
Coefficiente de deformación anisotrópica (II):	1,5
Coefficiente de deformación anisotrópica ($\perp$):	0,5
Coefficiente de deformación anisotrópica (Z):	1

En la Tabla 21, se observan los parámetros que se utilizaron para la simulación de la probeta para obtener resultados del comportamiento del material durante la fabricación.

Tabla 21. Otros parámetros de simulación.

Temperatura de la placa base ($^{\circ}\text{C}$):	80
Potencia láser (W):	370
Velocidad de escaneo (mm/s):	800

Espesor de capa (μm):	50
Diámetro del rayo láser (μm):	135
Ángulo de capa inicial ($^\circ$):	45 o 0
Ángulo de rotación de capa ($^\circ$):	0
Espaciado entre cordones (μm):	120
Ancho de banda de corte (mm):	10
Volumen (mm^3):	3903,84
Tamaño (x, y, z) (mm):	30, 12, 12
Conteo de triángulos	188
Tamaño de vóxel (mm):	0,5
Tasa de muestreo de vóxeles	5
Tipo de soporte	Automático
Ángulo de voladizo mínimo ($^\circ$):	45 °
Factor de soporte del coeficiente de seguridad	1
Relación de fuerza de rendimiento de soporte	0,4375
Distancia máxima a la pared (μm):	1600
Altura mínima de apoyo (mm):	5
Espesor de pared mínimo (μm):	100
Grosor de pared máximo (μm):	1000

6. RESULTADOS

6.1 VARIABLES MÁS IMPORTANTES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA

En la simulación de manufactura aditiva para el proceso de LPBF, las variables importantes en los parámetros de la máquina, que se han investigado son la potencia y velocidad del láser, como también la velocidad de alimentación del polvo, los cuales, tienen una relación con la calidad de la pieza.

En el presente proyecto se fabricaron probetas por la técnica de fusión por cama de polvo donde se varió el ángulo de fabricación y el espesor de las probetas para saber si estos parámetros afectan en la fabricación aditiva.

También se realizaron dos ponencias y un artículo para recalcar la importancia de los parámetros en la simulación aditiva de metales los cuales fueron:

- Una ponencia internacional en la jornada de investigadoras de castilla y león con el primer premio en ponencia flash con el resumen titulado *“la simulación de fabricación aditiva de metales asistida por computadora como potenciador de los actuales procesos”* ver anexo 2,
- Una ponencia nacional con el título *“análisis de parámetros mediante la simulación de manufactura aditiva para una probeta estándar”* ver anexo 3 y un artículo denominado “variables del proceso “fusión por lecho de polvo” mediante la simulación de manufactura aditiva en una probeta estándar”.

6.2 DATOS EXPERIMENTALES

6.2.1 Ensayo de tensión.

Se realizó un ensayo experimental de tensión para cada probeta, se obtuvieron los siguientes resultados.

6.2.1.1 Probeta 1.

Para la probeta 1 de radio 1 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 287,82 segundos (Figura 47), una deformación máxima de 0,3751 mm/mm y un esfuerzo máximo de 876,353 MPa.

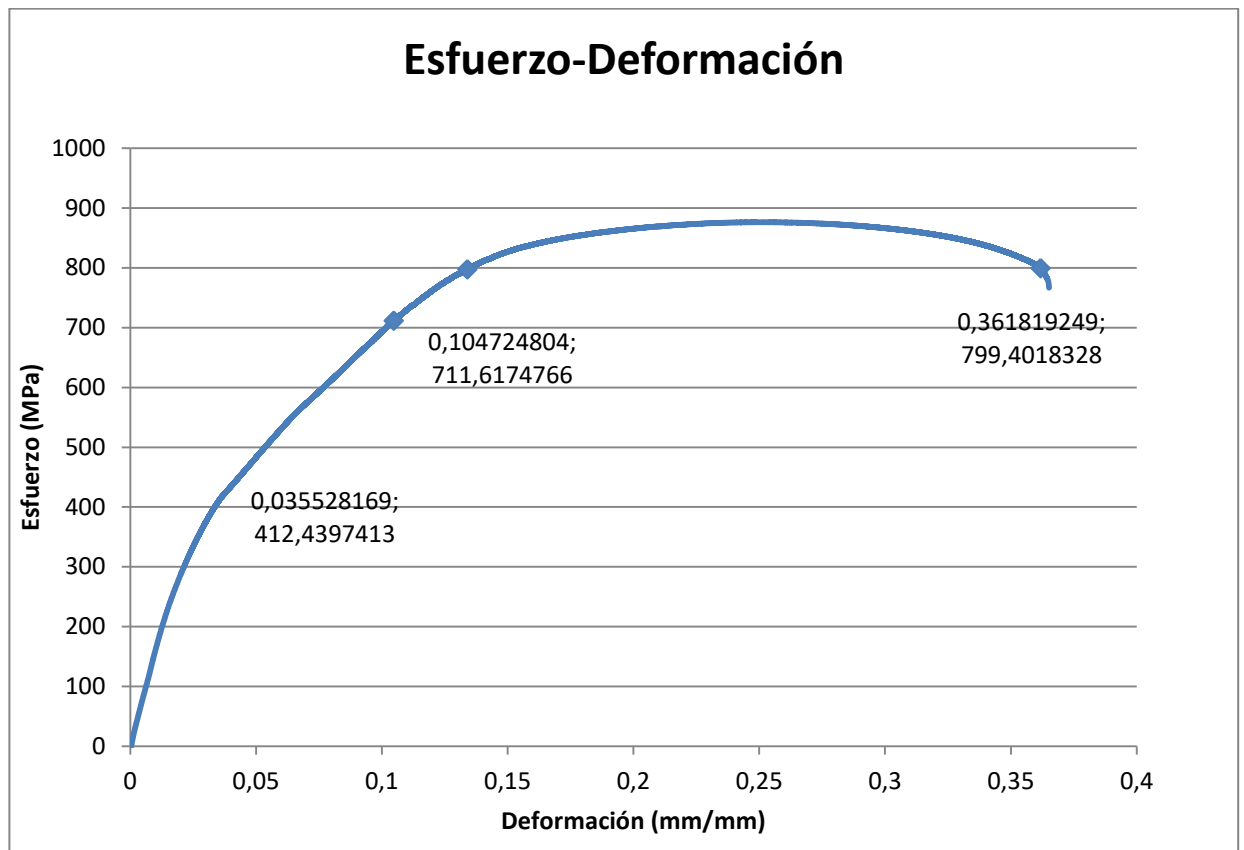
Figura 47. Resultado ensayo de tensión probeta 1.



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 4 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta 1.

Gráfica 4. Esfuerzo - deformación para 1.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta 1 son las mostradas en la siguiente Tabla 22.

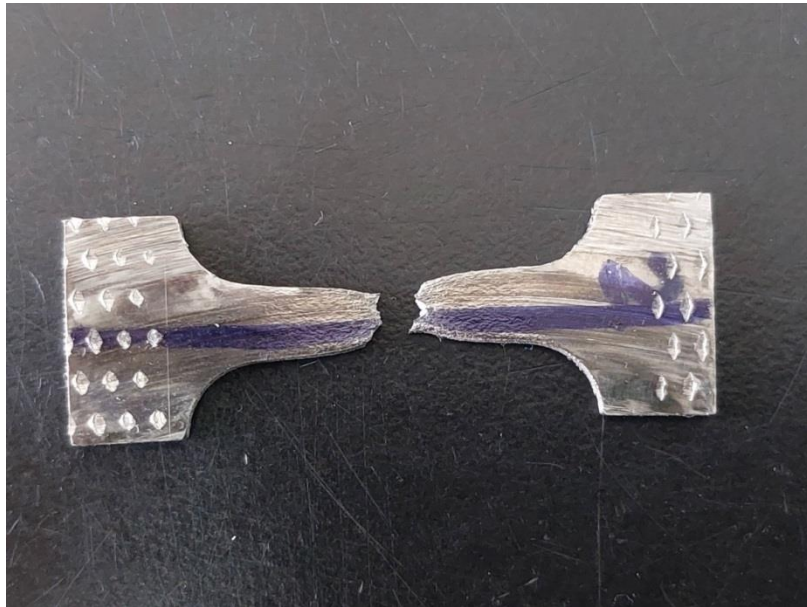
Tabla 22. Propiedades mecánicas para la probeta 1.

Resistencia a la tracción	860,17	MPa
Módulo elástico	16,7	GPa
Yield strength	276,76	Mpa

6.2.1.2 Probeta 2.

Para la probeta número dos de radio 4 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 195,6 segundos (Figura 48), una deformación máximo de 0,21214 mm/mm y un esfuerzo máximo de 865,209 MPa.

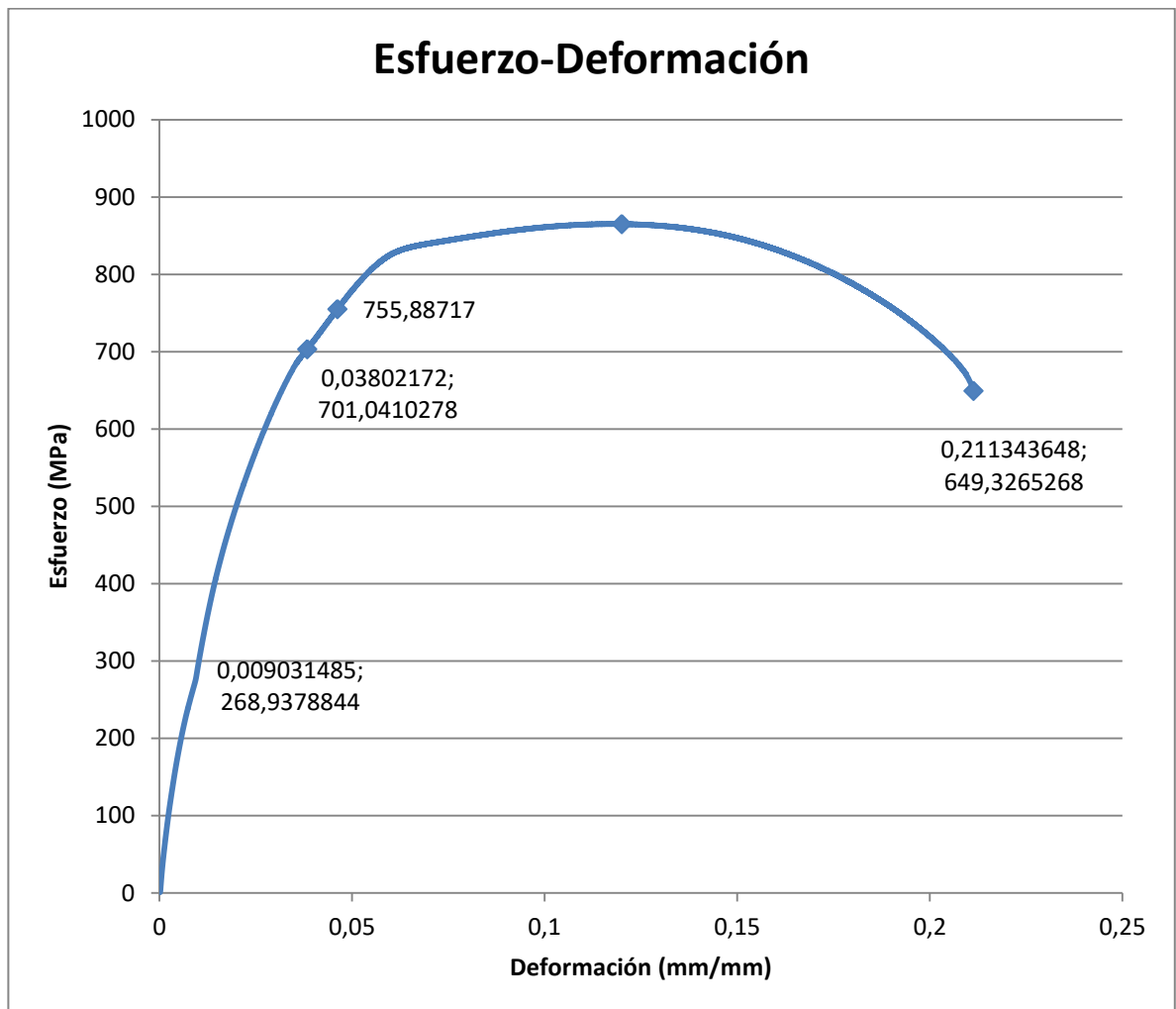
Figura 48. Resultado ensayo de tensión probeta 2.



Fuente: elaboración propia.

La siguiente Gráfica 5 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta número dos, con la que se podrá sacar las propiedades mecánicas del material fabricado por manufactura aditiva.

Gráfica 5. Esfuerzo - deformación para 2.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta número dos son las mostradas en la siguiente Tabla 23.

Tabla 23. Propiedades mecánicas para la probeta 2.

Resistencia a la tracción	863,38	MPa
Módulo elástico	69,45	GPa
Yield strength	251,74	MPa

6.2.1.3 Probeta 3.

Para la probeta número tres de radio 4 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 150,38 segundos (Figura 49), una deformación máxima de 0,18389 mm/mm y un esfuerzo máximo de 823,089 MPa.

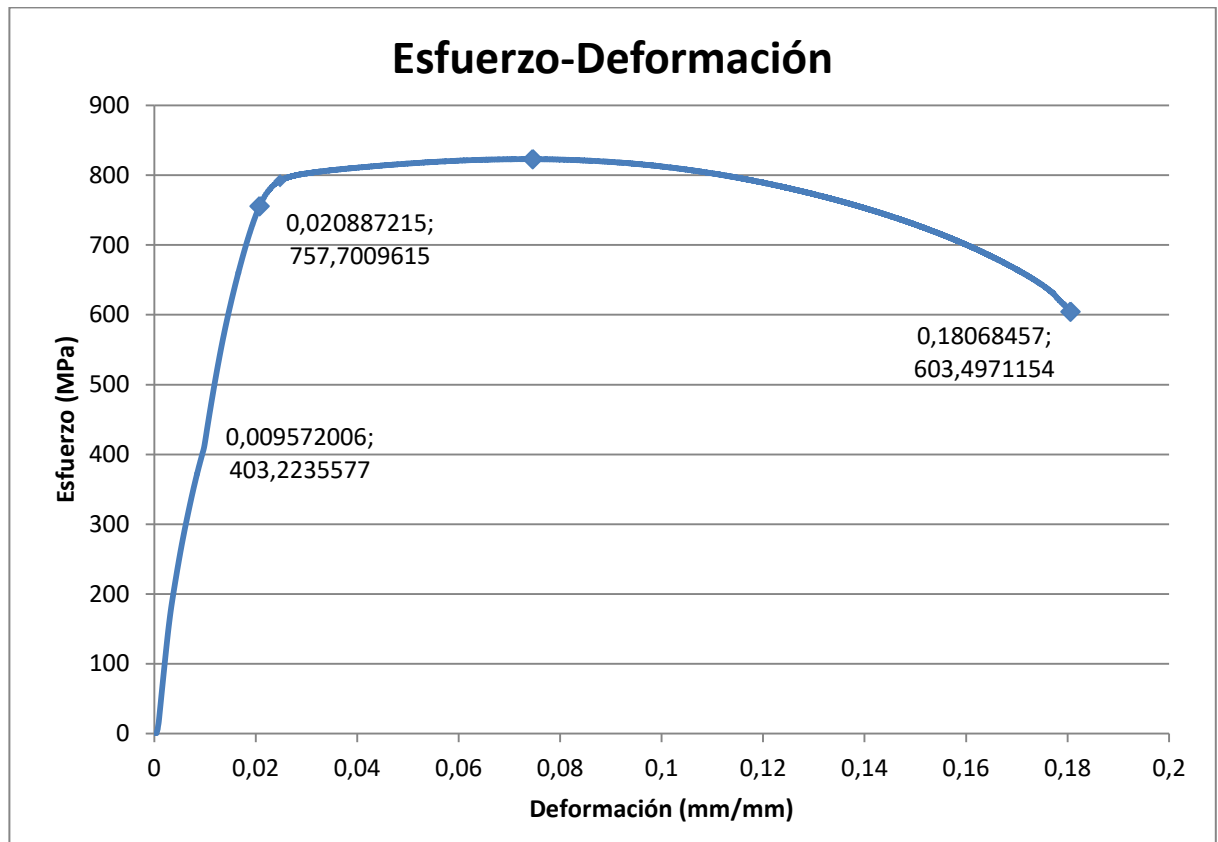
Figura 49. Resultado ensayo de tensión probeta 3.



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 6 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta número tres.

Gráfica 6. Esfuerzo - deformación para 3.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta número tres son las mostradas en la siguiente Tabla 24.

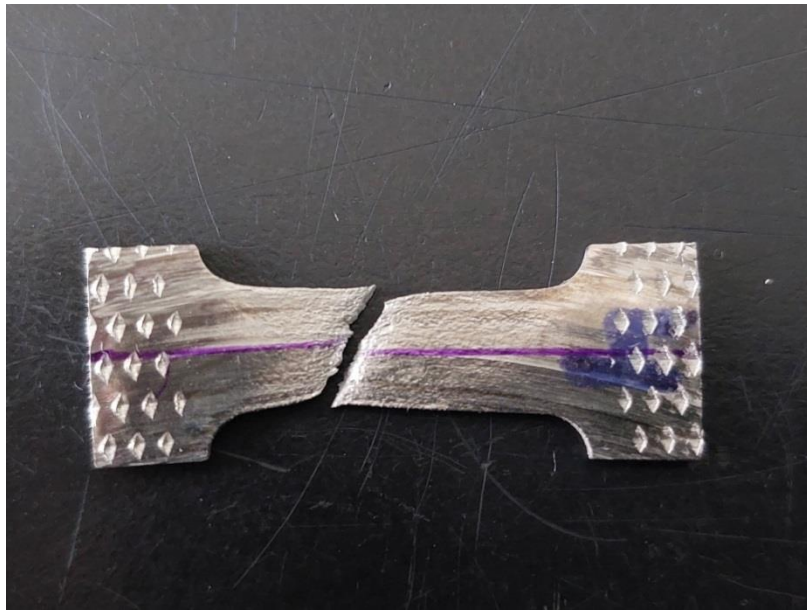
Tabla 24. Propiedades mecánicas para la probeta 3.

Resistencia a la tracción	825,07	MPa
Módulo elástico	61,12	GPa
Yield strength	367,61	MPa

6.2.1.4 Probeta 4.

Para la probeta número cuatro de radio 2,5 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 267,47 segundos (Figura 50), una deformación máxima de 0,3261 mm/mm y un esfuerzo máximo de 862,977 Mpa.

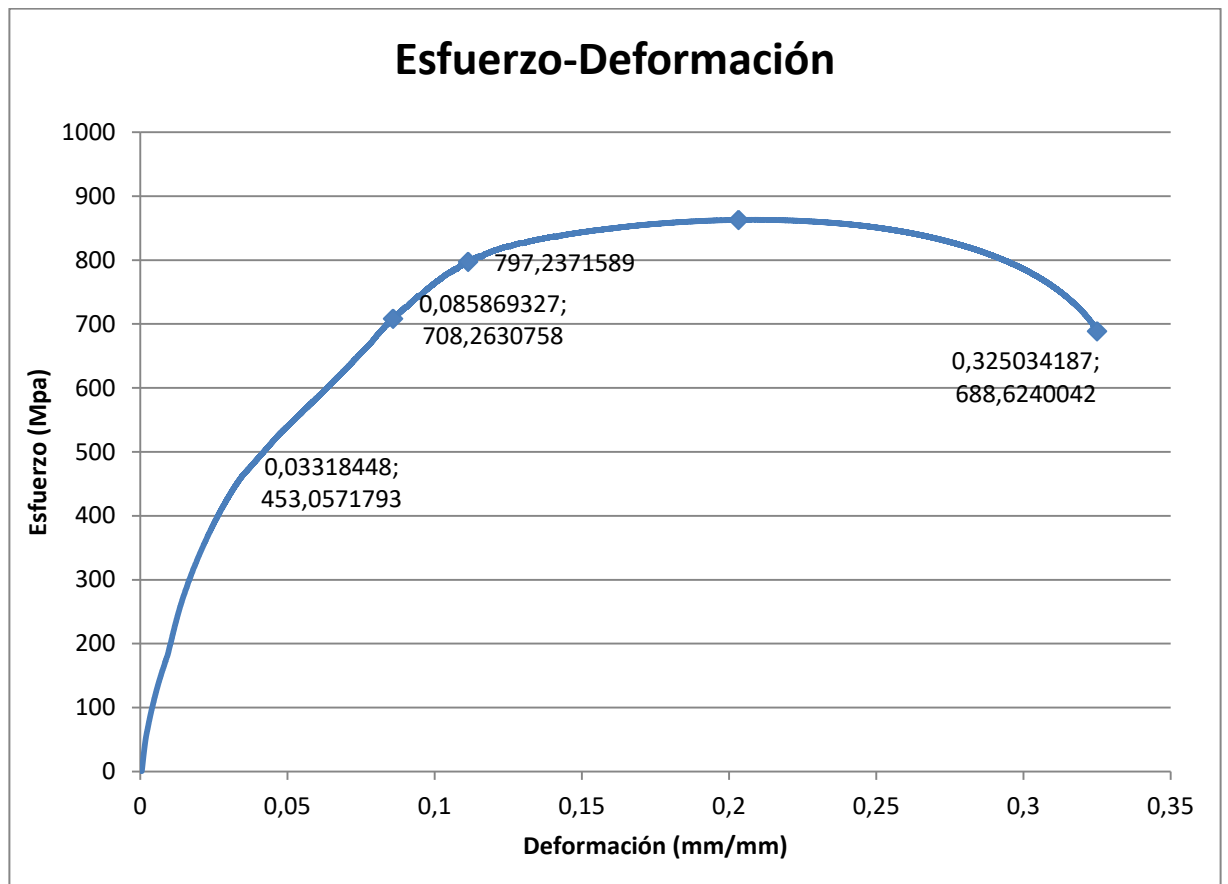
Figura 50. Resultado ensayo de tensión probeta 4.



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 7 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta número cuatro.

Gráfica 7. Esfuerzo - deformación para 4.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta número cuatro son las mostradas en la siguiente Tabla 25.

Tabla 25. Propiedades mecánicas para la probeta 4.

Resistencia a la tracción	863,66	MPa
Módulo elástico	35,58	GPa
Yield strength	237,66	MPa

6.2.1.5 Probeta 5.

Para la probeta número cinco de radio 1 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 354,12 segundos (Figura 51), una deformación máxima de 0,4422 mm/mm y un esfuerzo máximo de 906,999 MPa.

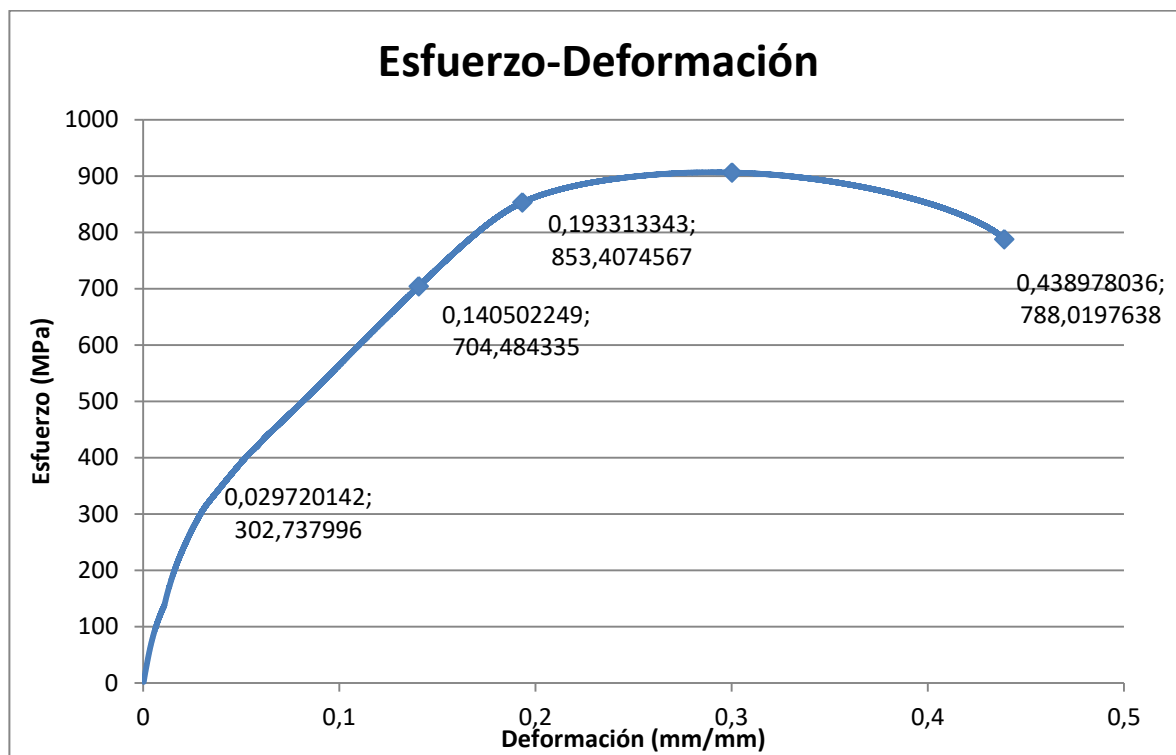
Figura 51. Resultado ensayo de tensión probeta 5.



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 7 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta número cinco.

Gráfica 8. Esfuerzo - deformación para 5.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta número cinco son las mostradas en la siguiente Tabla 26.

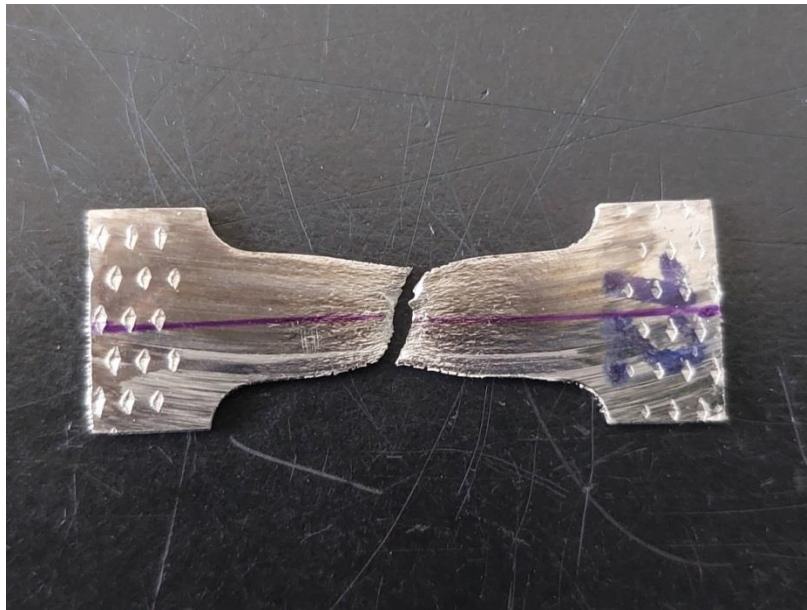
Tabla 26. Propiedades mecánicas para la probeta 5.

Resistencia a la tracción	1004,9	MPa
Módulo elástico	259,05	GPa
Yield strength	872,43	MPa

6.2.1.6 Probeta 12.

Para la probeta número doce de radio 2,4 mm se obtuvo la rotura total en un tiempo de 206,26 segundos (Figura 52), una deformación máxima de 0,2388 mm/mm y un esfuerzo máximo de 809,246 MPa.

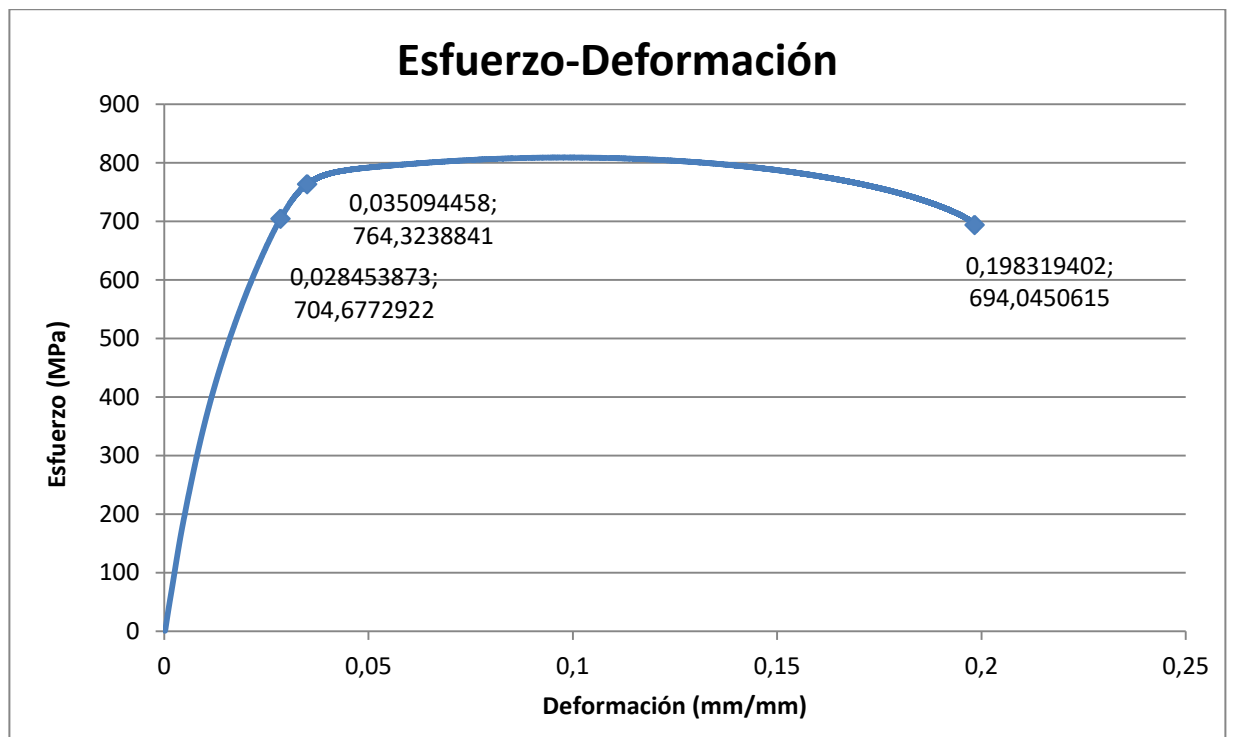
Figura 52. Resultado ensayo de tensión probeta 12.



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 9 muestra el esfuerzo vs la deformación de la probeta número doce.

Gráfica 9. Esfuerzo - deformación para 12.



Las propiedades mecánicas sacadas de la gráfica para la probeta número doce son las mostradas en la siguiente Tabla 27. Propiedades mecánicas para la probeta 12.

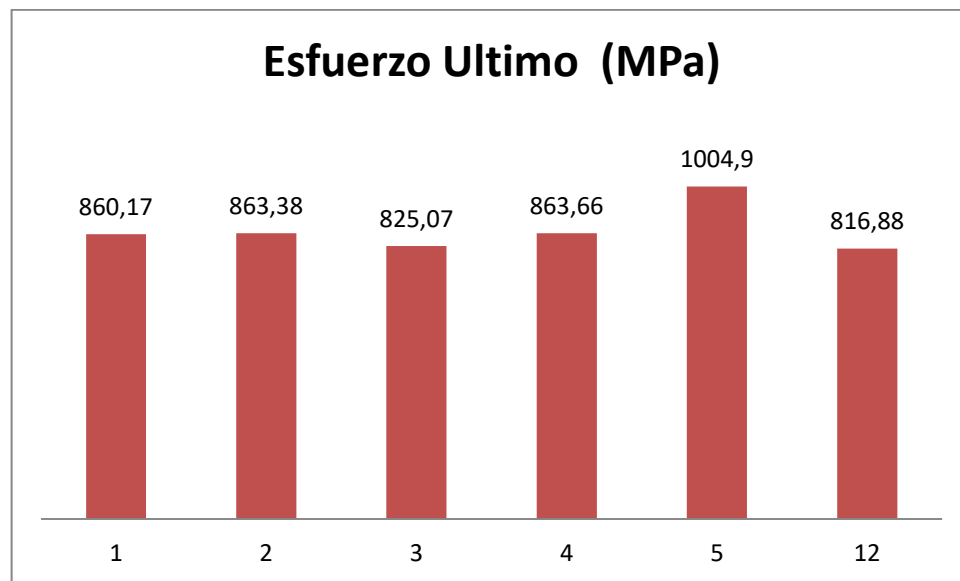
Tabla 27. Propiedades mecánicas para la probeta 12.

Resistencia a la tracción	816,88	MPa
Módulo elástico	40,676	GPa
Yield strength	424,99	MPa

6.2.1.7 Propiedades mecánicas

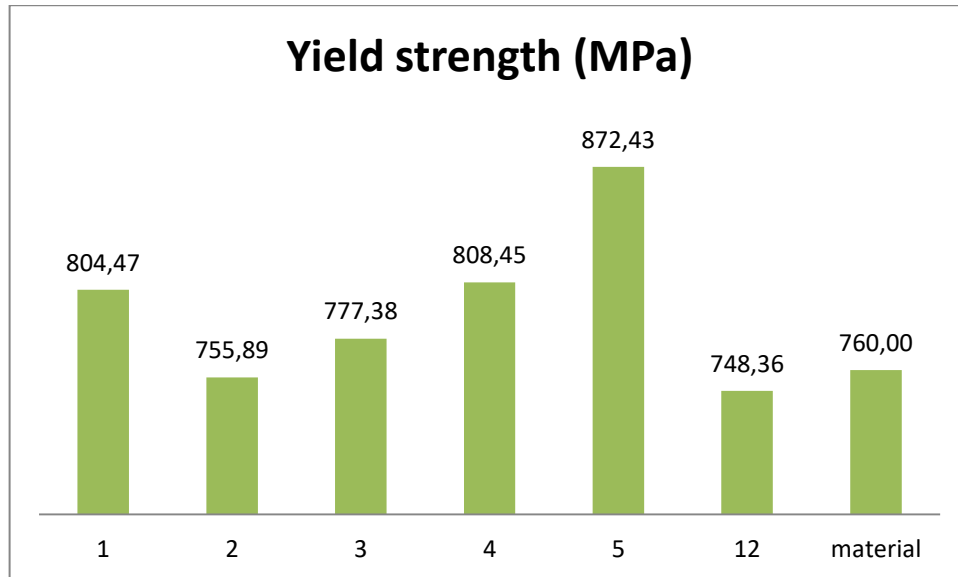
Como resultado se obtuvieron tres propiedades mecánicas para cada probeta, en la Gráfica 10 se puede observar el esfuerzo último de los seis ensayos de tensión, el más alto fue el de la probeta 5 de 1004,9 MPa y el menor fue el de 12 con 816,88 MPa.

Gráfica 10. Esfuerzo último.



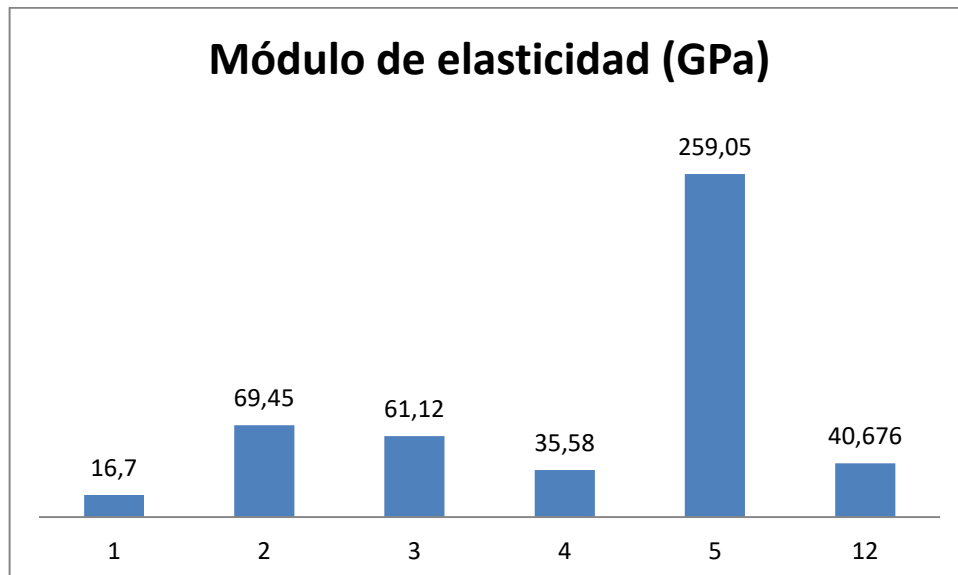
Para el límite de elasticidad se muestra en la Gráfica 11, los valores obtenidos para cada probeta, el mayor yield strength fue el de la probeta 5 con valor de 872,43 MPa y el menor fue el de 12 con 748,36 MPa.

Gráfica 11. Yield Strength.



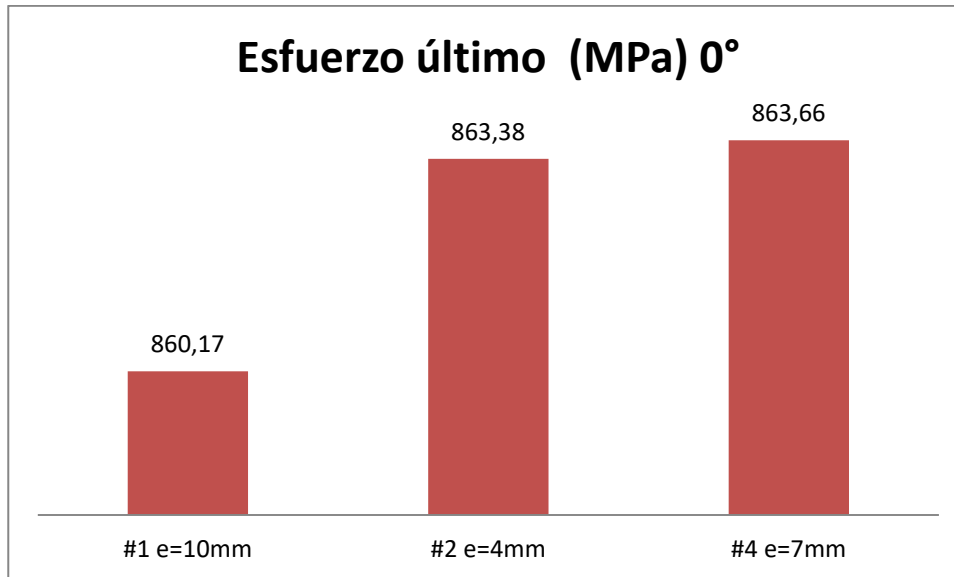
La probeta 5 fue la de mayor módulo de elasticidad con un valor de 259,05 GPa y el menor fue la de 1 con 16,7 GPa como se observa en la Gráfica 12.

Gráfica 12. Módulo de elasticidad.



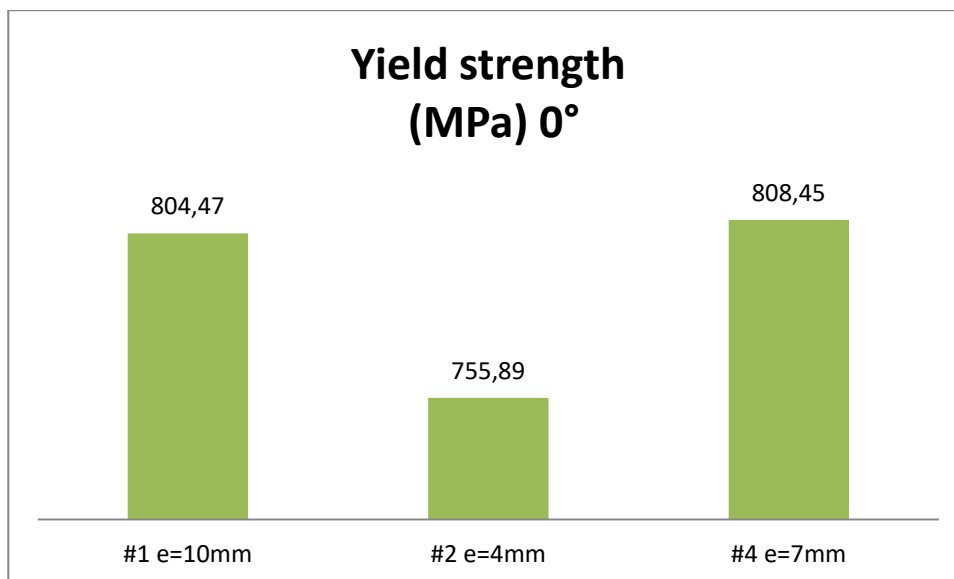
En la Gráfica 13 se puede observar el esfuerzo último para las tres probetas fabricadas con ángulo 0°, el más alto fue el de la probeta 4 de 863,66 MPa y el menor fue el de 1 con 860,17 MPa.

Gráfica 13. Esfuerzo último para 0°.



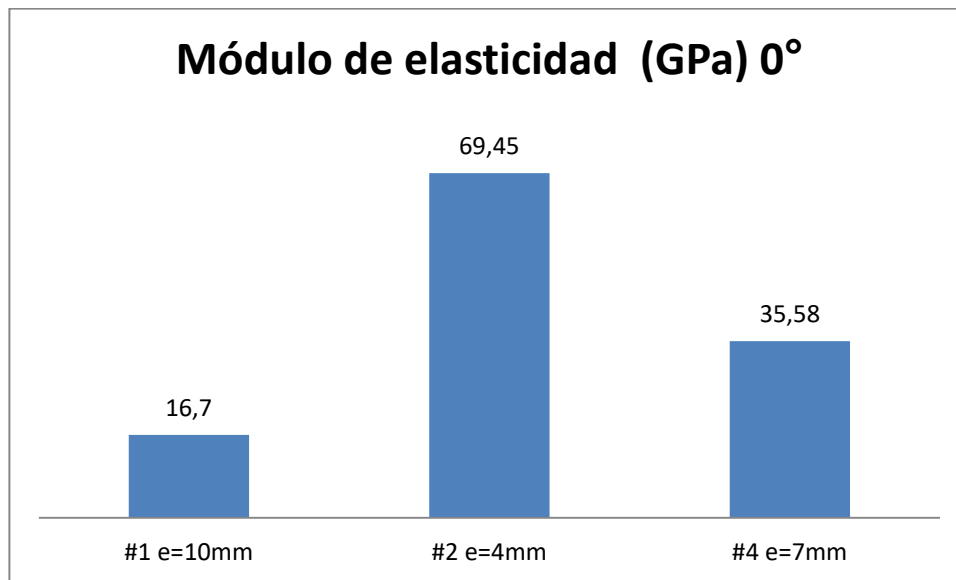
Para la Gráfica 14 se puede observar el límite elástico de las tres probetas fabricadas con ángulo 0°, el más alto fue el de la probeta 4 con 808,45 MPa y el menor fue el de 2 con 755,89 MPa.

Gráfica 14. Yield strength para 0°.



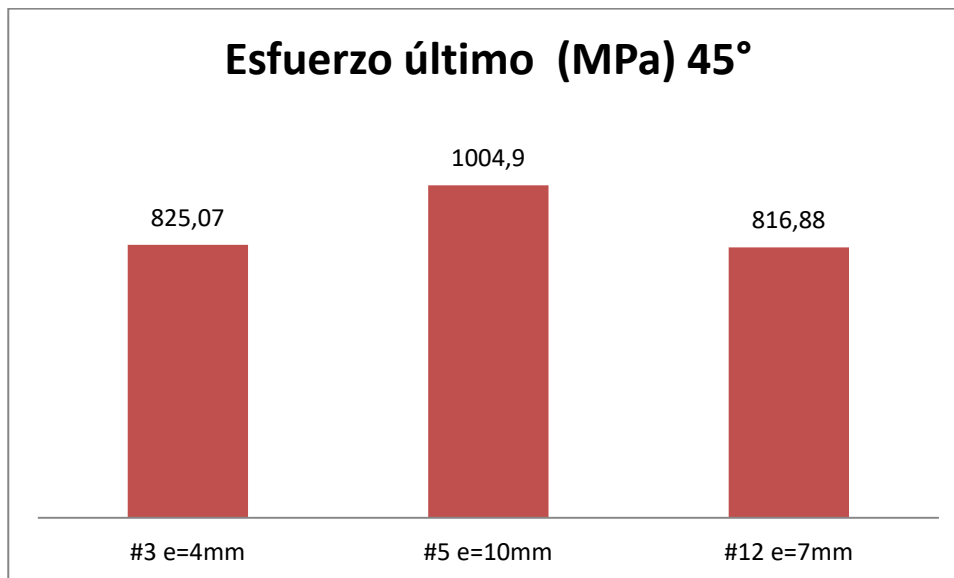
El módulo de elasticidad de las tres probetas fabricadas con ángulo 0° , el más alto fue el de la probeta 2 con 69,45 GPa y el menor fue para 1 con 16,7 GPa, como se observar en la Gráfica 15.

Gráfica 15. Módulo de elasticidad para 0° .



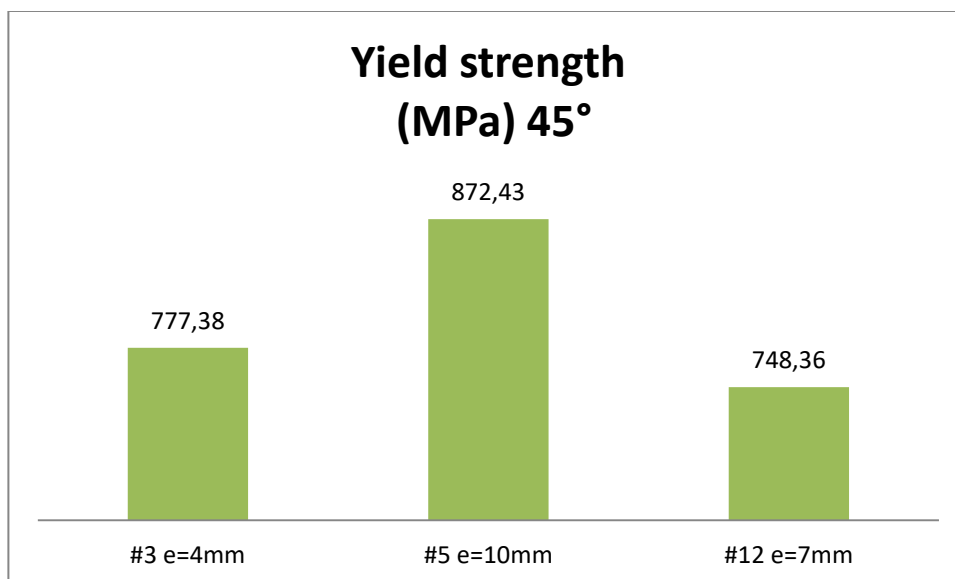
En la Gráfica 16 se puede observar el esfuerzo último para las tres probetas fabricadas con ángulo 45° , el más alto fue el de la probeta 5 de 1004,9 MPa y el menor fue el de 12 con 816,88 MPa.

Gráfica 16. Esfuerzo último para 45°.



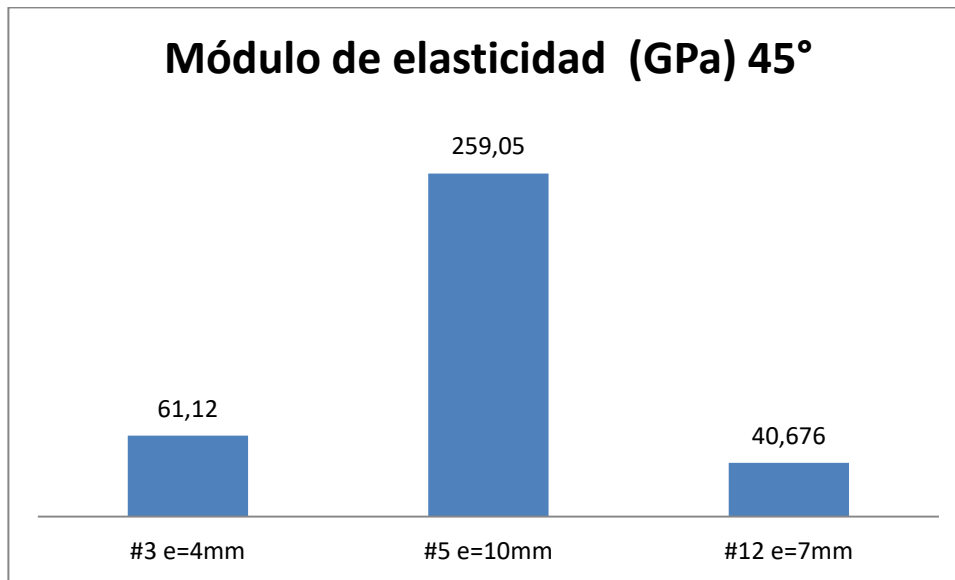
Para la Gráfica 17 se puede observar el límite elástico de las tres probetas fabricadas con ángulo 45°, el más alto fue el de la probeta 5 con 872,43 MPa y el menor fue el de 12 con 748,36 MPa.

Gráfica 17. Yield strength para 45°.



El módulo de elasticidad de las tres probetas fabricadas con ángulo 45°, el más alto fue el de la probeta 5 con 259,05 GPa y el menor fue para 12 con 40,676 GPa, como se observar en la Gráfica 18.

Gráfica 18. Módulo de elasticidad para 45°.



6.3 DATOS DE SIMULACIÓN

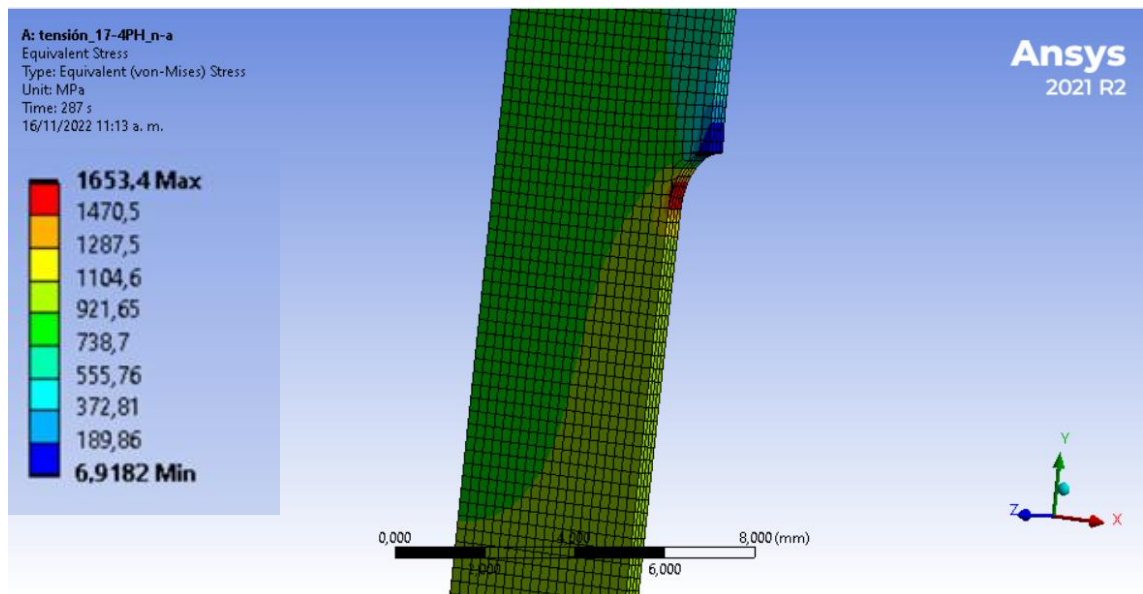
6.3.1 Simulación ensayo de tensión.

Los resultados de la simulación de cada probeta fueron los siguientes.

6.3.1.1 Probeta 1.

En la probeta 1 se obtuvieron resultados del esfuerzo, el cual fue de 6,9182 MPa para el menor y de 1653,4 MPa para el mayor, este se concentró más en la curva de la probeta como se observa en Figura 53.

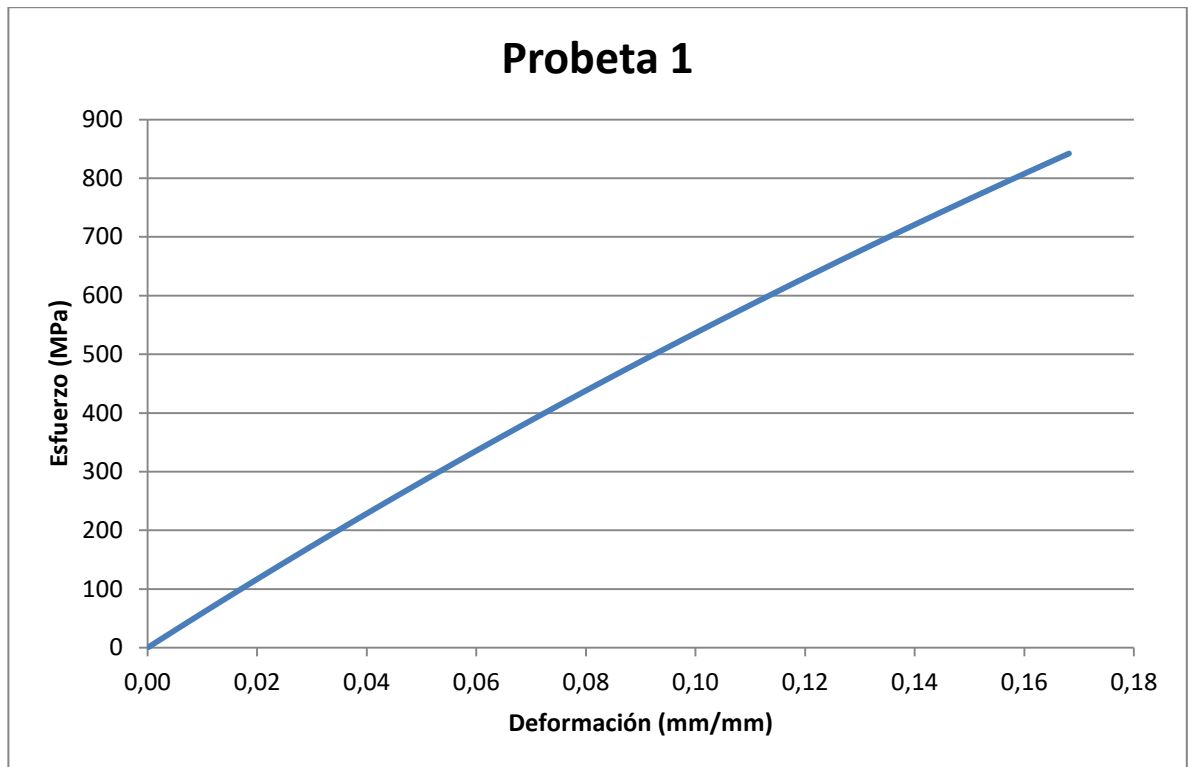
Figura 53. Simulación de tensión probeta 1.



Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 19 muestra el esfuerzo – deformación que se obtuvo de la simulación para la probeta número 1.

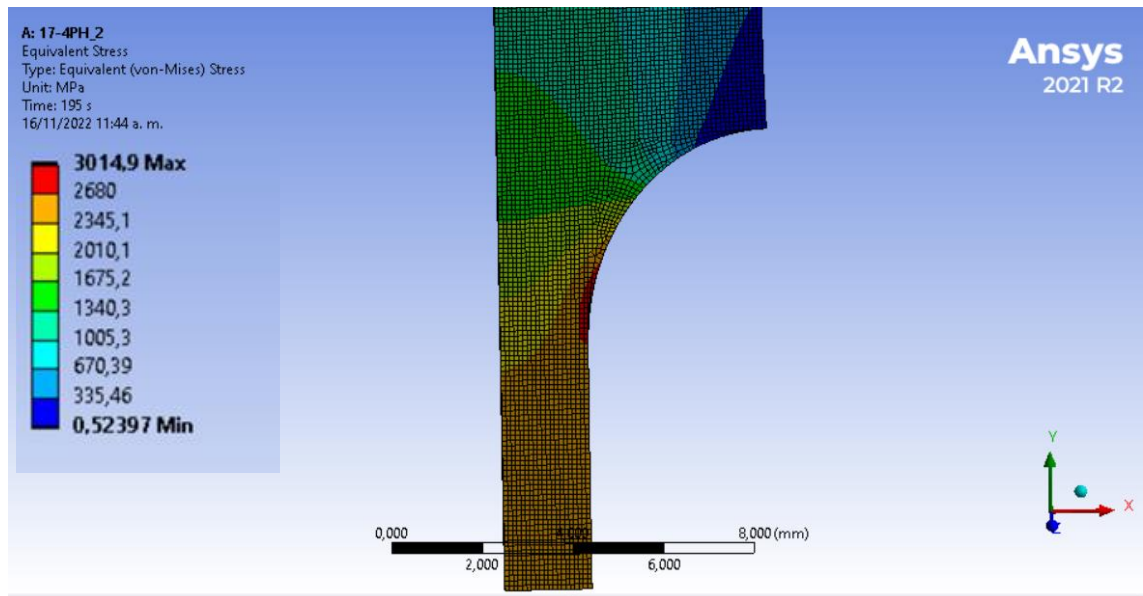
Gráfica 19. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 1.



6.3.1.2 Probeta 2.

En el caso de la probeta 2 los resultados por simulación que se obtuvieron para el menor esfuerzo fueron de 0,52397 MPa y para el mayor esfuerzo de 3014,9 MPa generado en la parte de la curva como se muestra en la Figura 54.

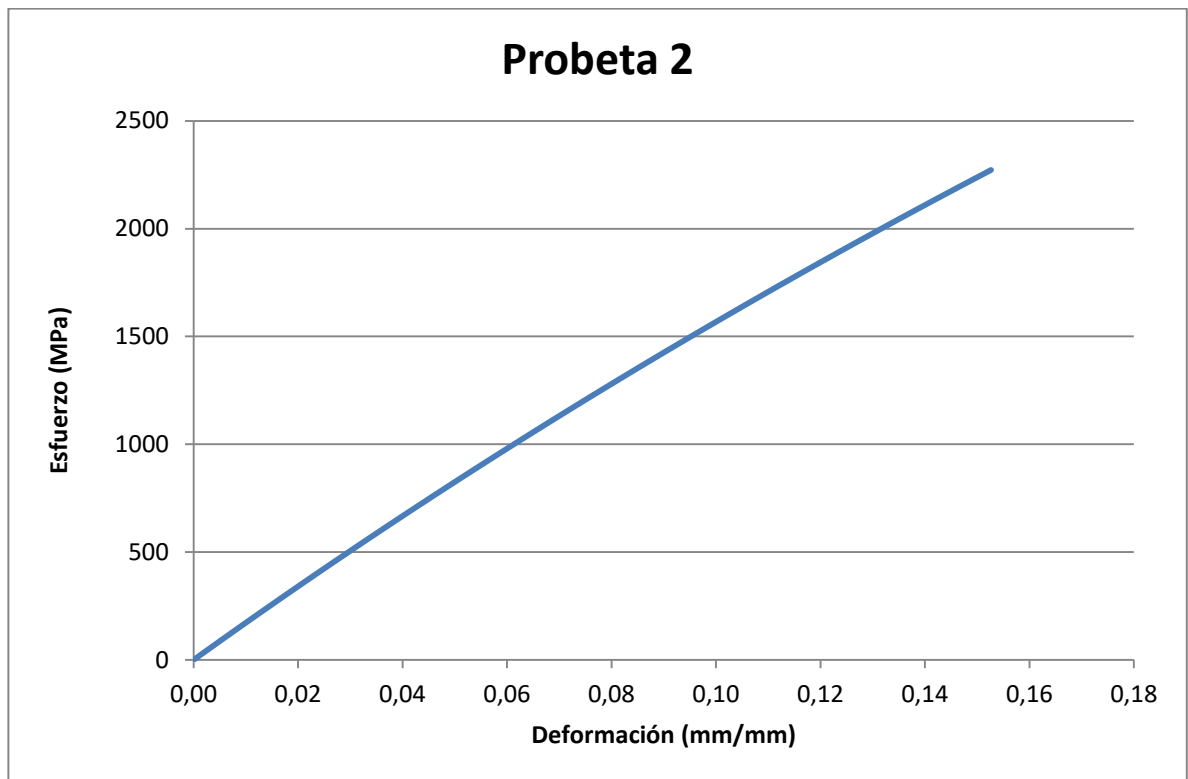
Figura 54. Simulación de tensión probeta 2.



Fuente: elaboración propia.

Los datos de simulación se pueden ver en la Gráfica 20, donde se observa el esfuerzo – deformación para la probeta número 2.

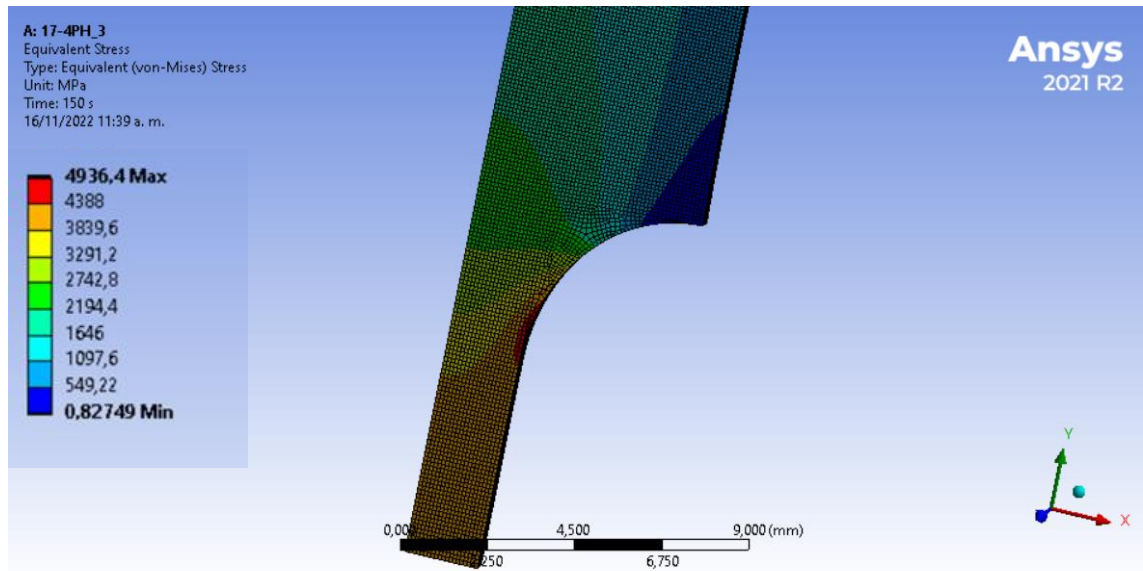
Gráfica 20. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 2.



6.3.1.3 Probeta 3.

La simulación de los esfuerzos de la probeta número 3, se pueden observar en la Figura 55, donde el mayor esfuerzo es de 4936,4 MPa ocurrido en la curva de la probeta y el menor es de 0,82749 MPa en el exterior.

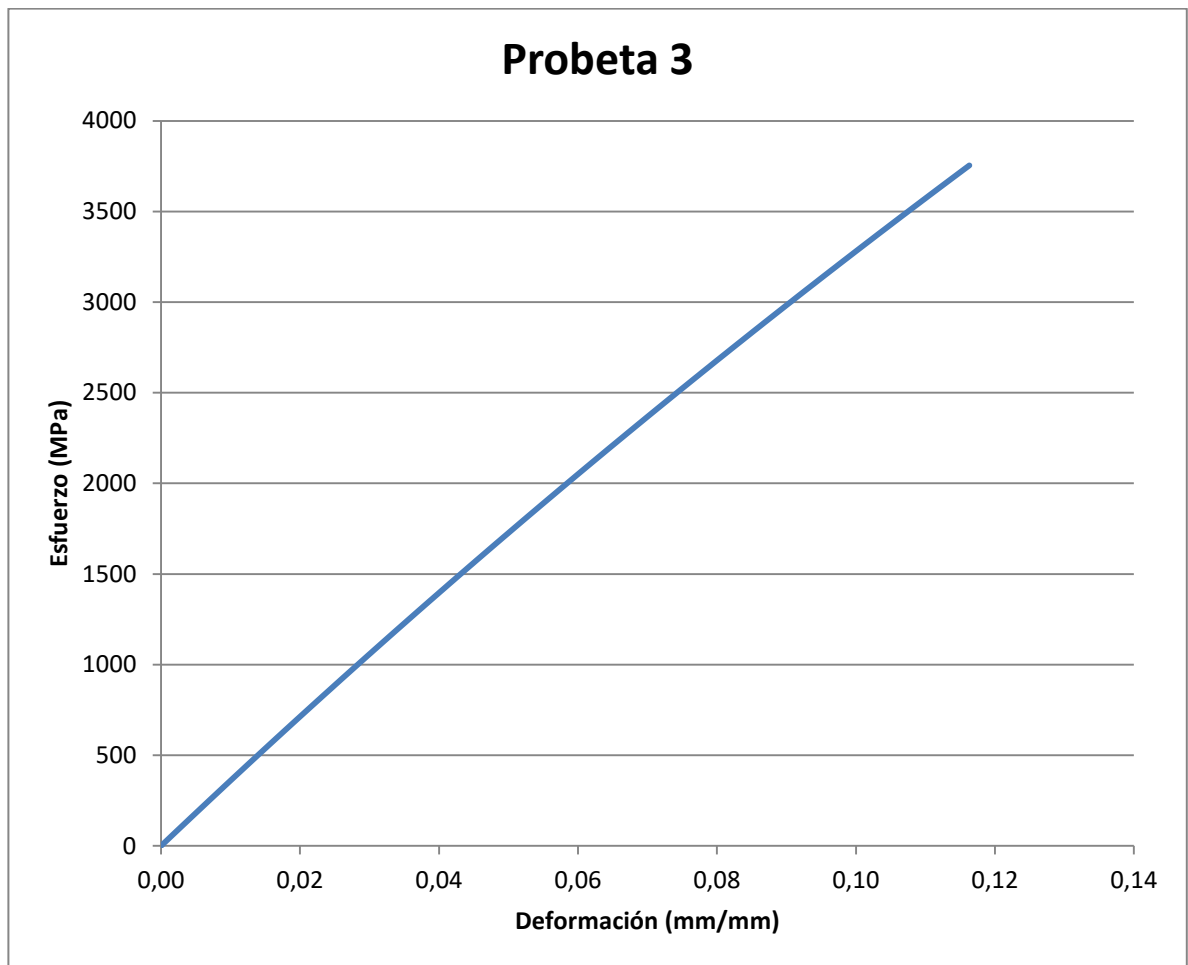
Figura 55. Simulación de tensión probeta 3.



Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 21 se pueden observar los valores del esfuerzo vs deformación obtenidos de la simulación para la probeta 3.

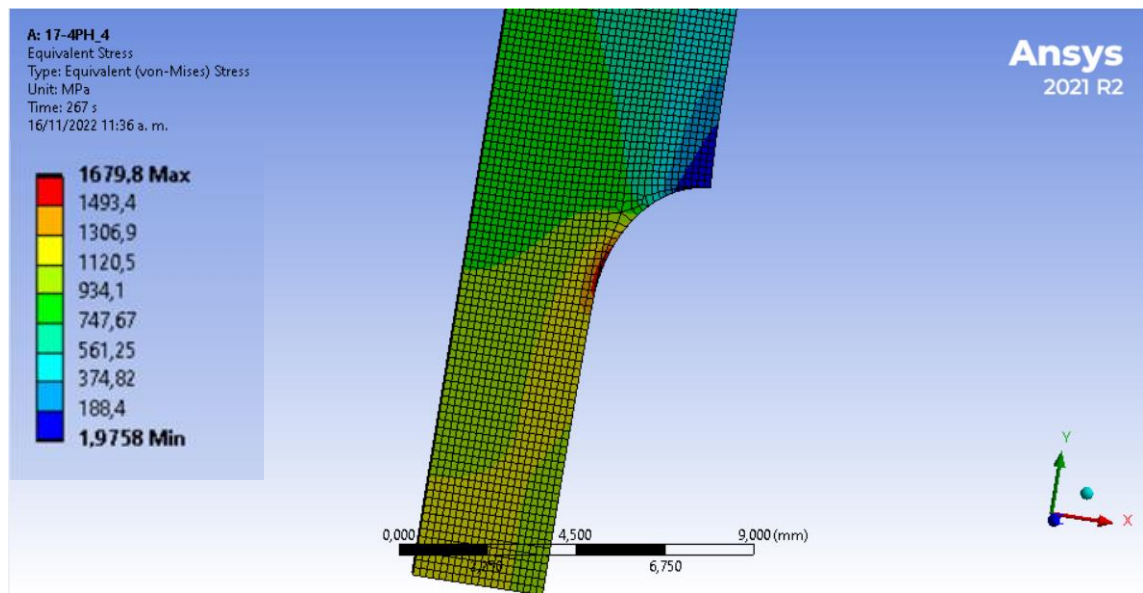
Gráfica 21. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 3.



6.3.1.4 Probeta 4.

En la Figura 56 se puede ver los resultados de la simulación de la probeta 4, donde el esfuerzo máximo es de 1679, 8 MPa con mayor concentración en la curva de la probeta y el mínimo fue de 1,9758 MPa.

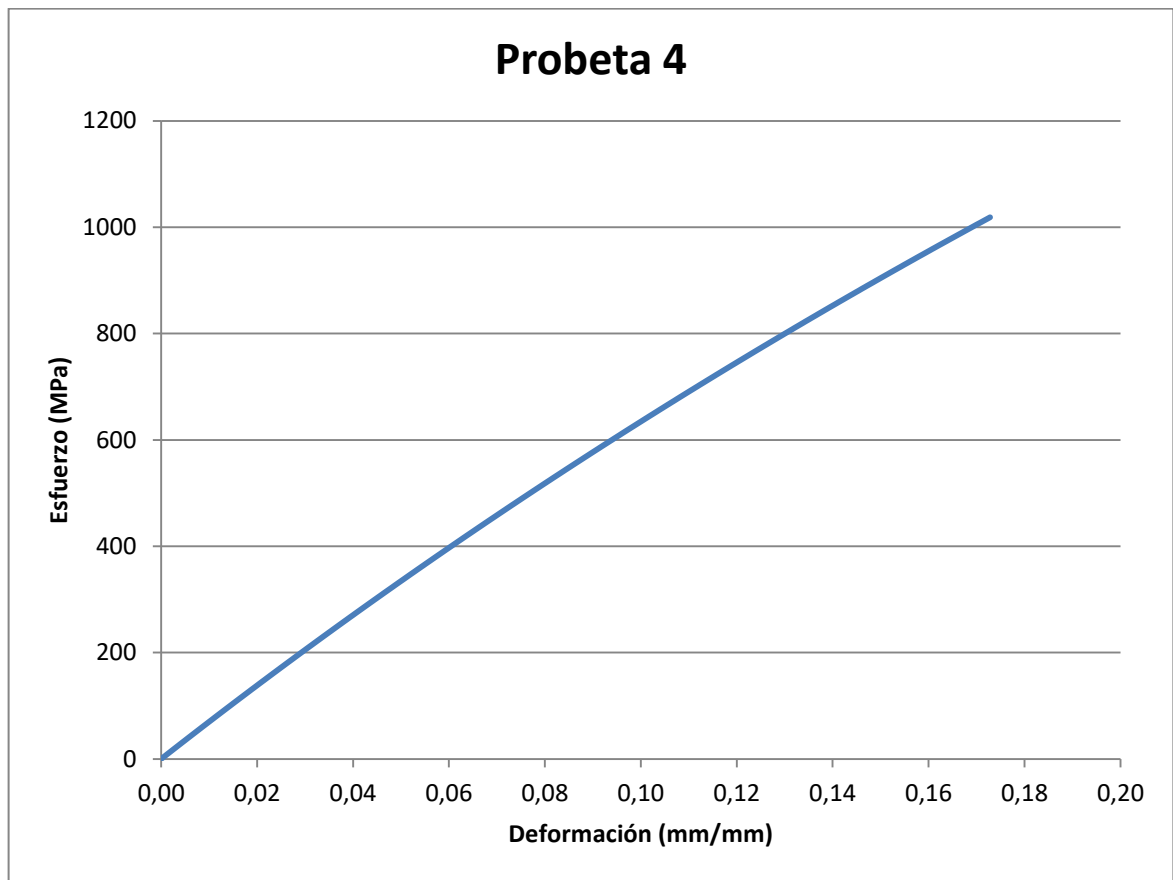
Figura 56. Simulación de tensión probeta 4.



Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 22 muestra el esfuerzo – deformación que se obtuvo de la simulación para la probeta número 4.

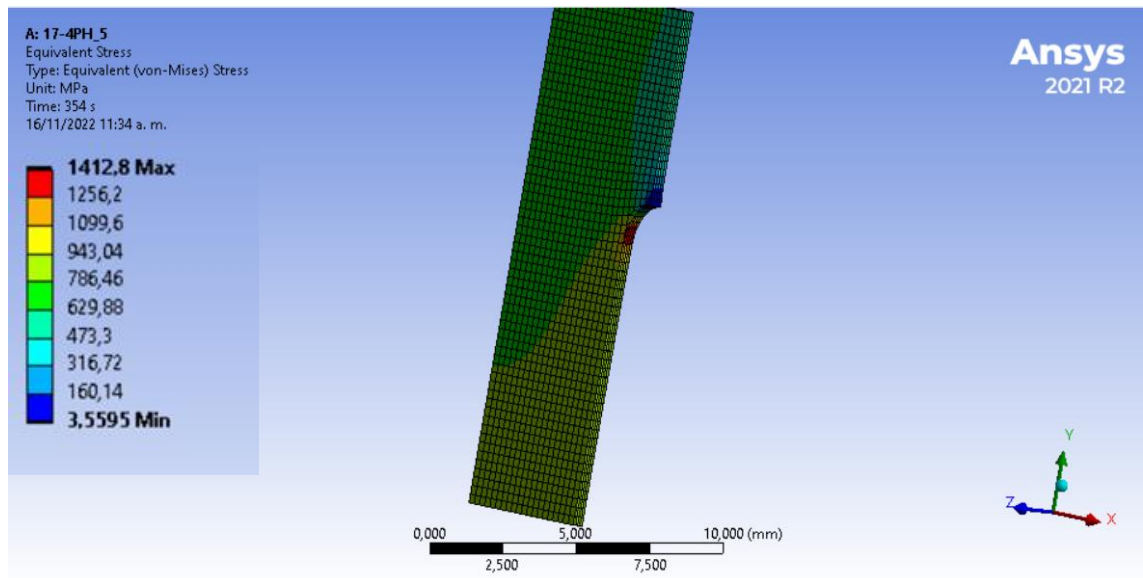
Gráfica 22. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 4.



6.3.1.5 Probeta 5.

En la probeta 5 se obtuvieron resultados del esfuerzo, el cual fue de 3,5595 MPa para el menor y de 1412,8 MPa para el mayor, este se concentró más en la curva de la probeta como se observa en Figura 57.

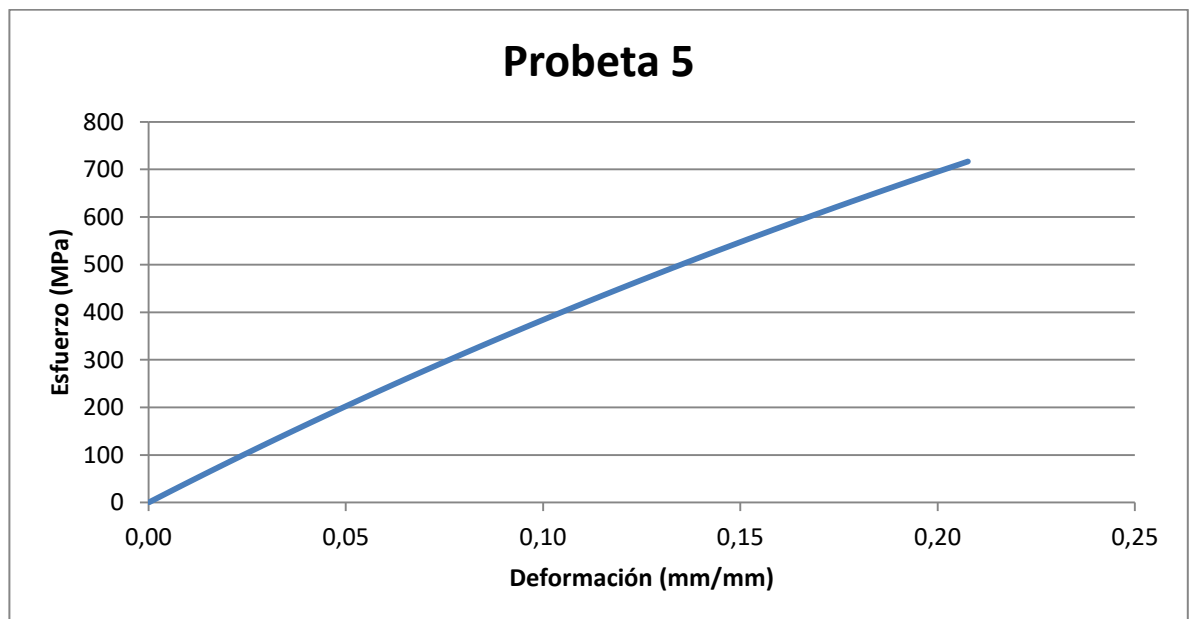
Figura 57. Simulación de tensión probeta 5.



Fuente: elaboración propia.

Los datos de simulación se pueden ver en la Gráfica 23, donde se observa el esfuerzo – deformación para la probeta número 5.

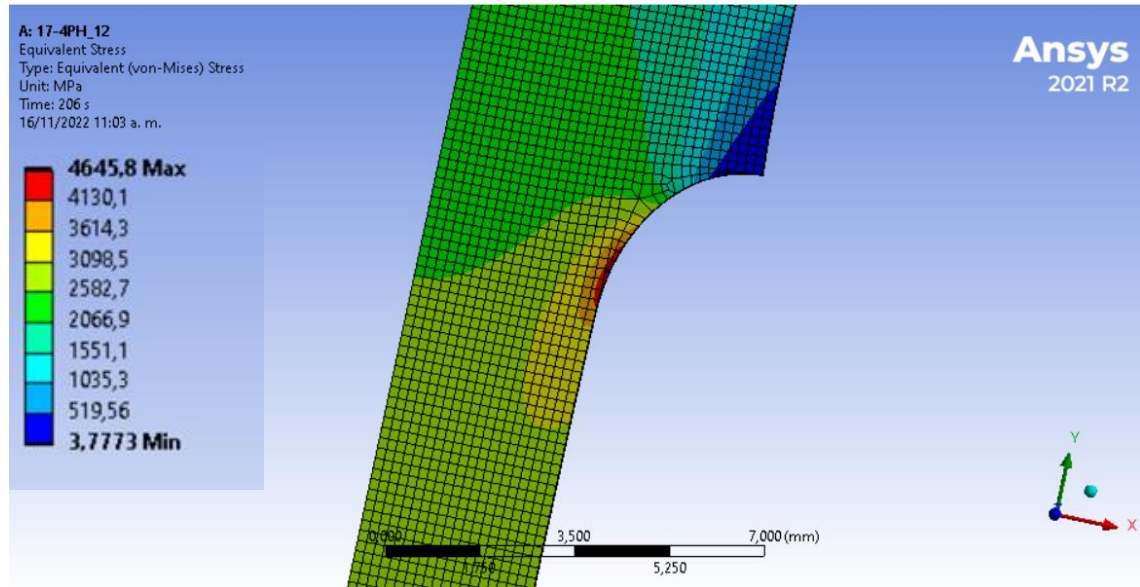
Gráfica 23. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 5.



6.3.1.6 Probeta 12.

La simulación de los esfuerzos de la probeta número 12, se pueden observar en la Figura 58, donde el mayor esfuerzo es de 4645,8 MPa ocurrido en la curva de la probeta y el menor es de 3,7773 MPa en el exterior.

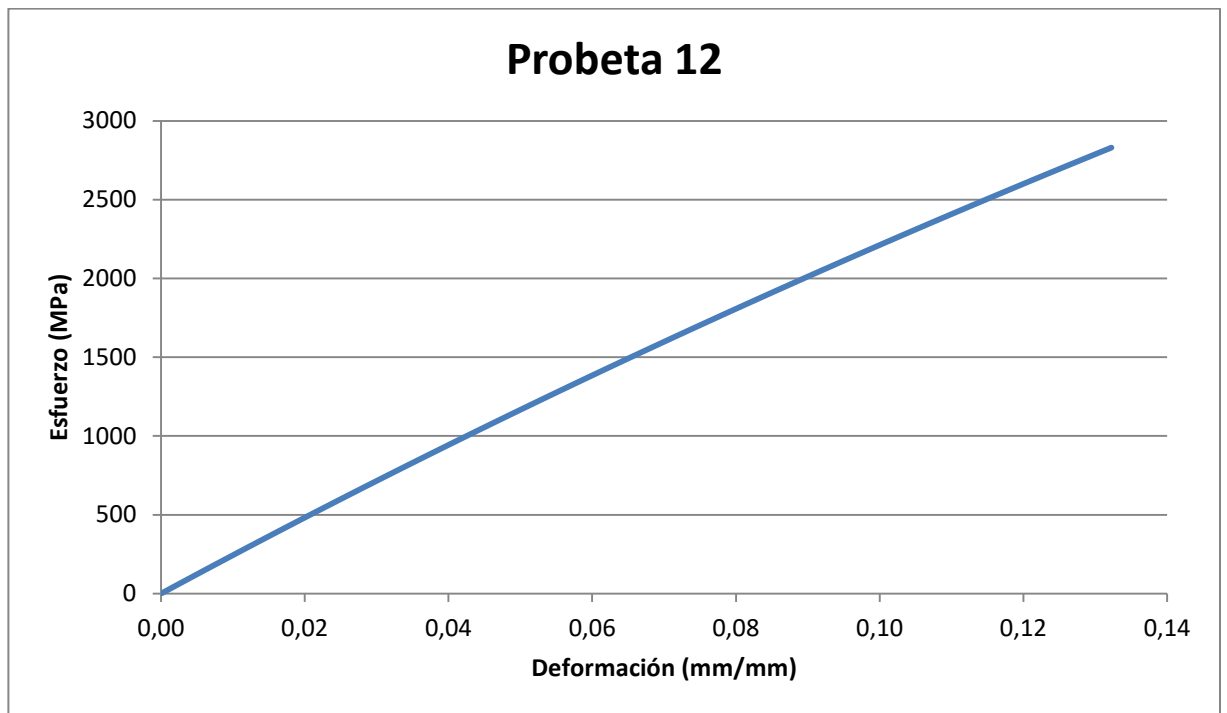
Figura 58. Simulación de tensión probeta 12.



Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 24 se puede observar los valores del esfuerzo vs deformación obtenidos de la simulación para la probeta 12.

Gráfica 24. Datos esfuerzo - deformación de simulación para la probeta 12.

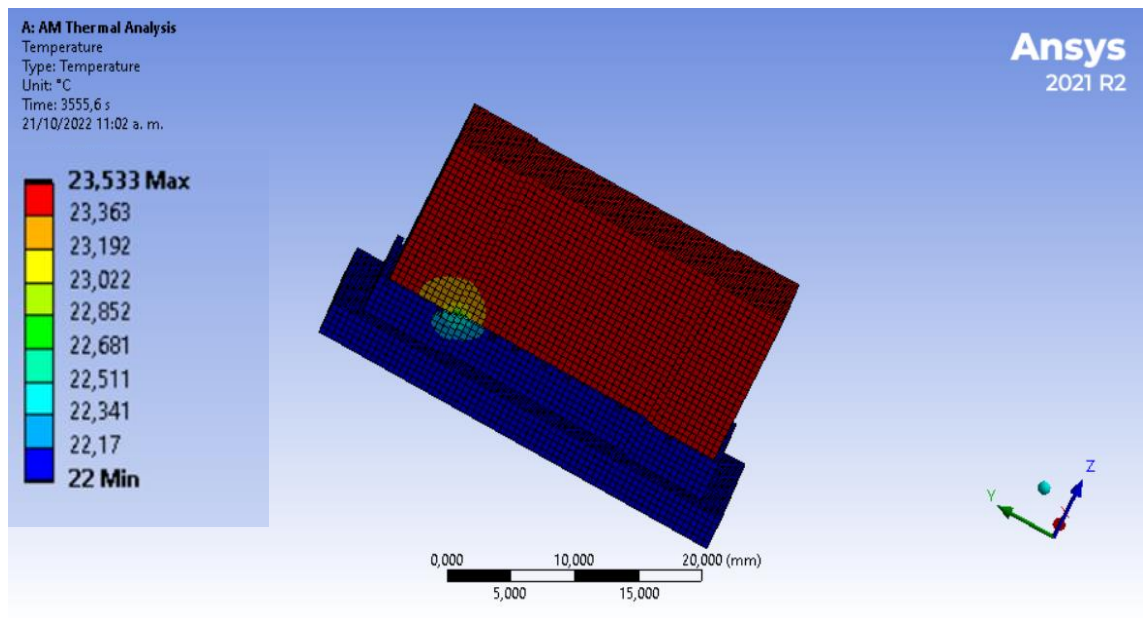


6.3.2 Simulación fabricación aditiva.

6.3.2.1 Con soporte predeterminado.

En la Figura 59 se puede observar el resultado de la variación de la temperatura en la probeta con soporte predeterminado; los cuales, van desde los 22 °C hasta los 23,533 °C.

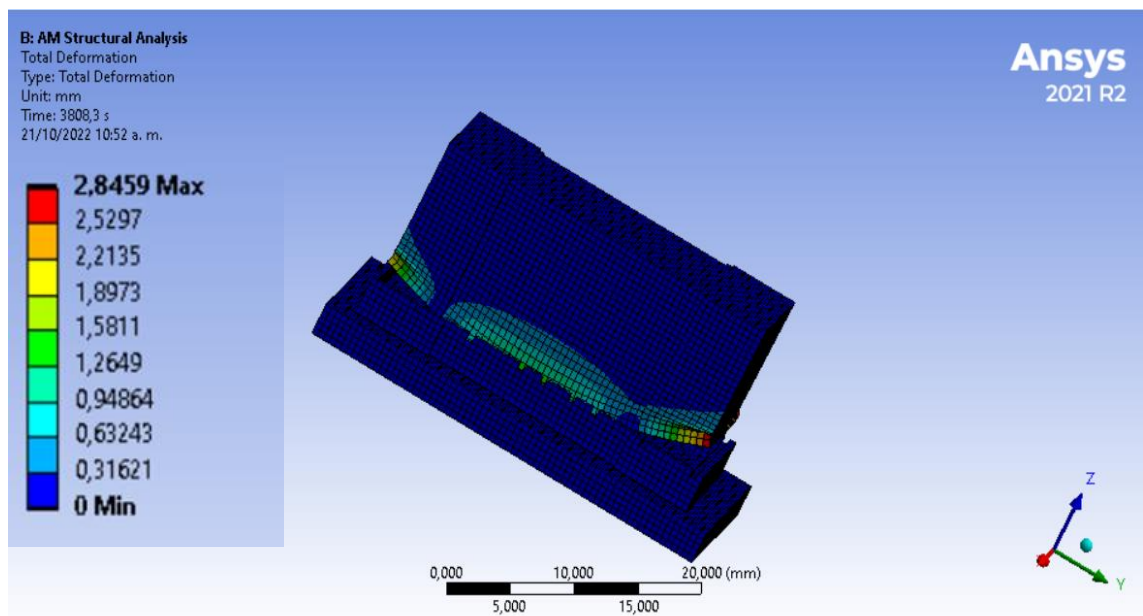
Figura 59. Temperatura con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

La deformación total se puede observar en la Figura 60, donde la máxima es de 2,8459 mm y se genera en los extremos de la probeta en contacto con el soporte.

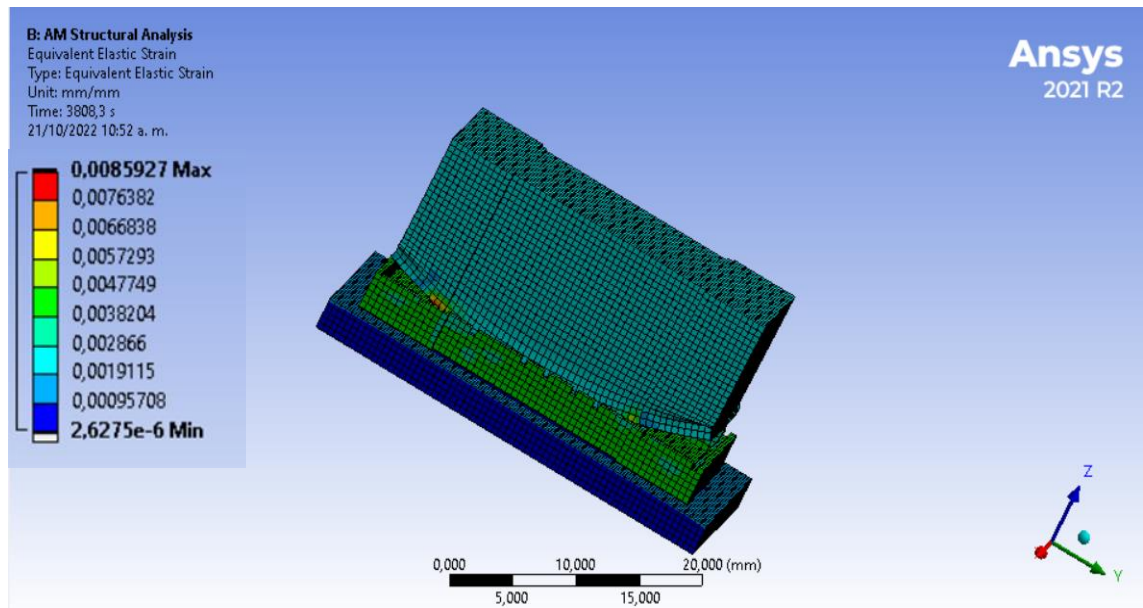
Figura 60. Deformación total con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

La deformación elástica equivalente se da en mayor medida en el contacto del soporte con la probeta y es de máximo 0,0085927 mm/mm como se muestra en la Figura 61.

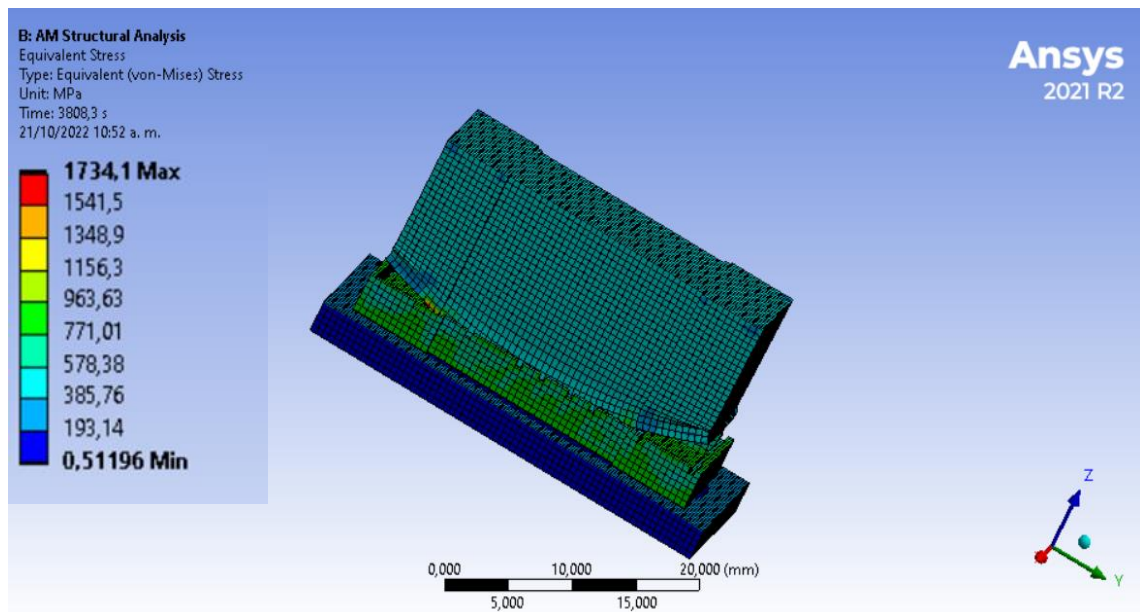
Figura 61. Deformación elástica con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo equivalente de von-Mises también se da en la parte del contacto entre la probeta y el soporte y es de máximo 1734,1 MPa como se observa en la Figura 62.

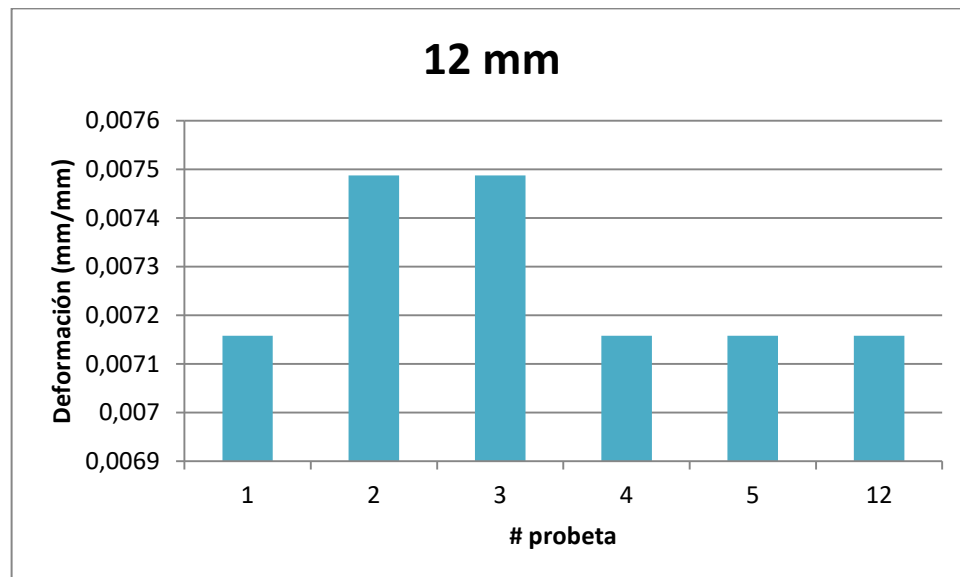
Figura 62. Esfuerzo von-Mises con soporte predeterminado.



Fuente: elaboración propia.

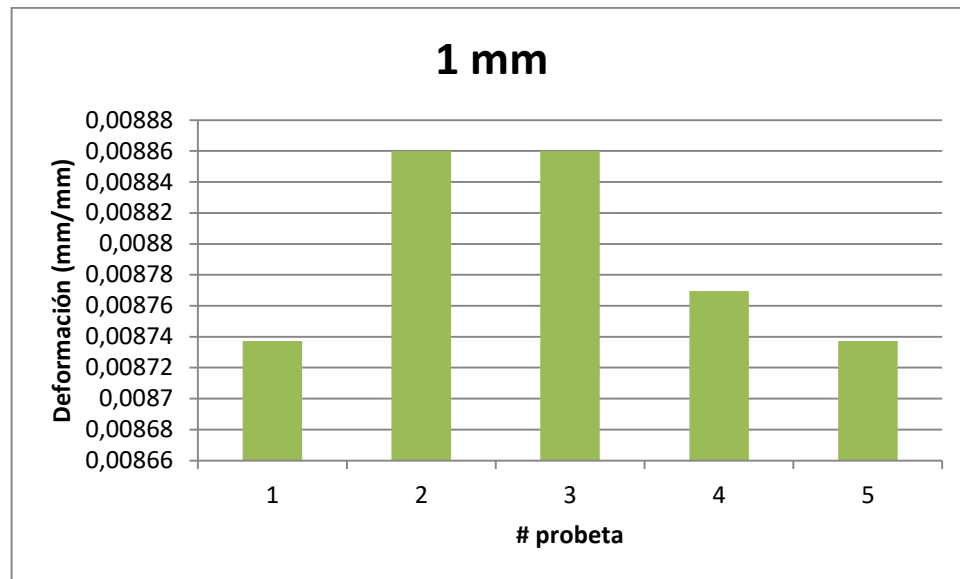
Se realizaron seis simulaciones con los diferentes parámetros con soporte predeterminado, para las tres geometrías obtenidas con el espesor original de la fabricación como se ve en la siguiente Gráfica 25.

Gráfica 25. Deformación de las probetas espesor 12 mm.



También se realizaron seis simulaciones para las tres geometrías diferentes con espesor de 1 mm que fue el utilizado en los ensayos de tensión como se observa en la Gráfica 26.

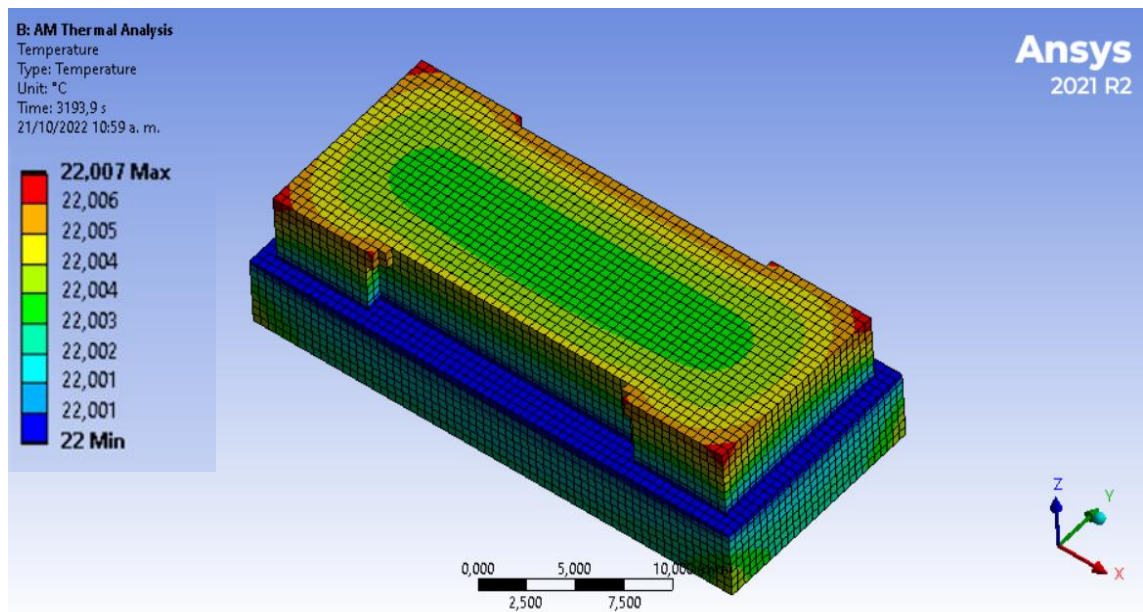
Gráfica 26. Deformación de las probetas espesor 1 mm.



6.3.2.2 Con soporte automático.

En la siguiente Figura 63 se puede observar que la diferencia de temperatura con soporte generado o automático no varía mucho con el tiempo, a diferencia que con el soporte predeterminado; la máxima temperatura aproxima es de 22 °C con soporte automático y se presenta en las esquinas de la probeta.

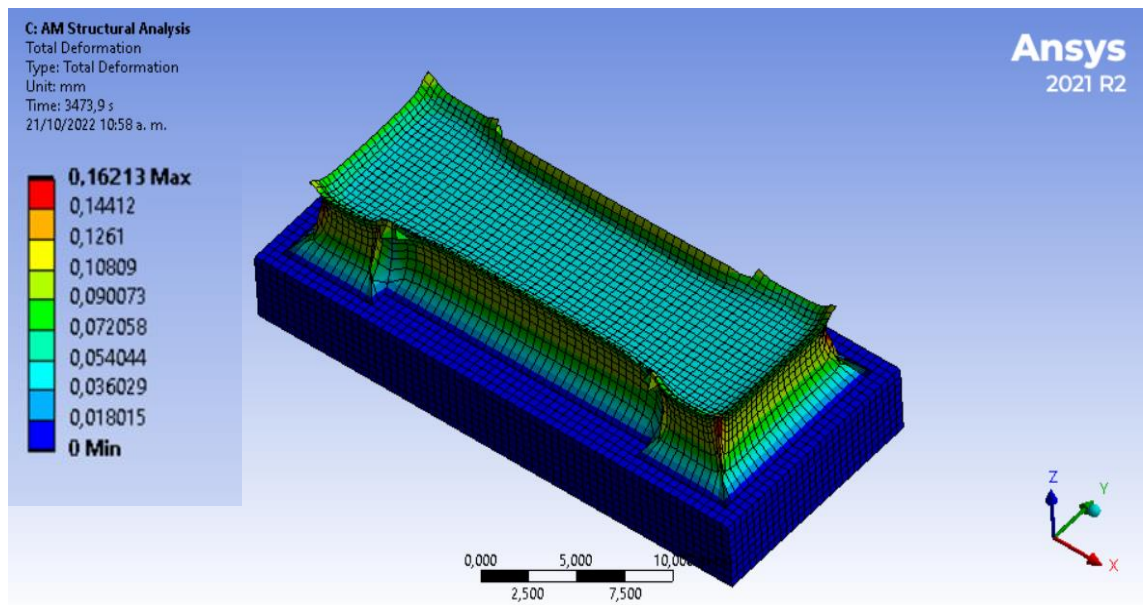
Figura 63. Temperatura con soporte automático.



Fuente: elaboración propia.

La deformación total máxima es de 0,16213 mm y se genera en los bordes de la probeta como se observa en la Figura 64.

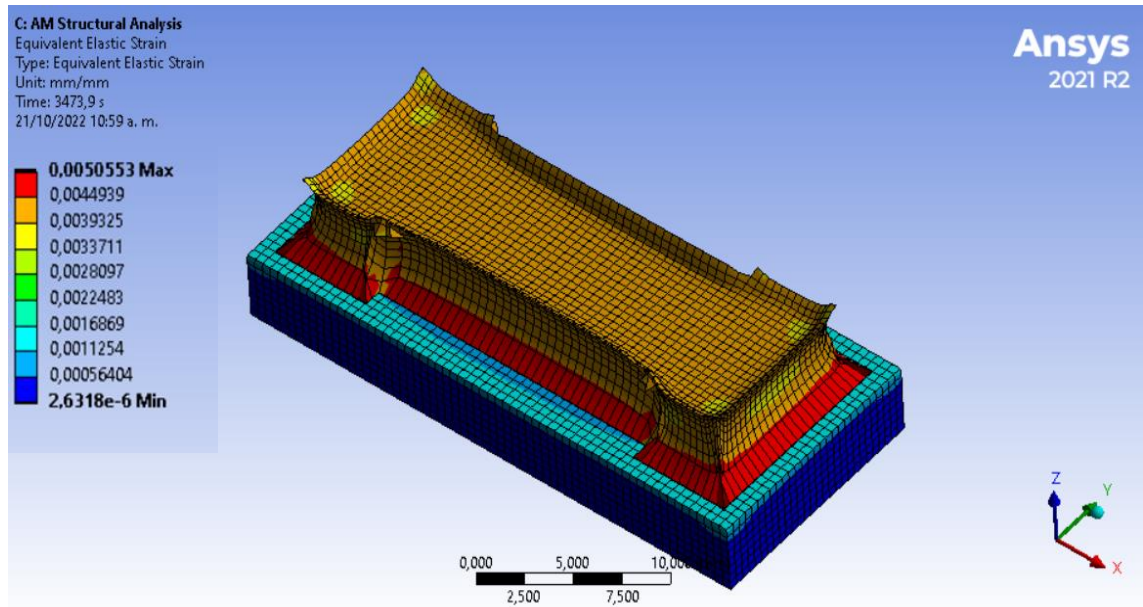
Figura 64. Deformación total con soporte automático.



Fuente: elaboración propia.

La deformación elástica equivalente máxima, se genera en las primeras capas del soporte automático como se muestra en la Figura 65 y es de 0,0050553 mm/mm.

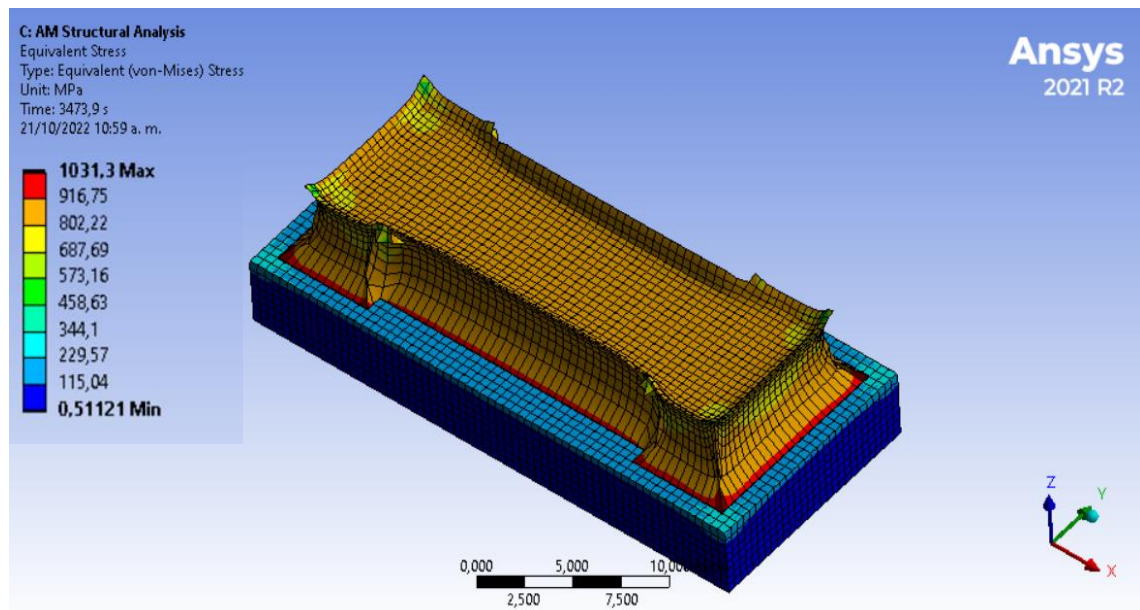
Figura 65. Deformación elástica con soporte automático.



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo máximo en la probeta se genera en las primeras capas del soporte automático y es de 1031,3 MPa como se observa en la Figura 66.

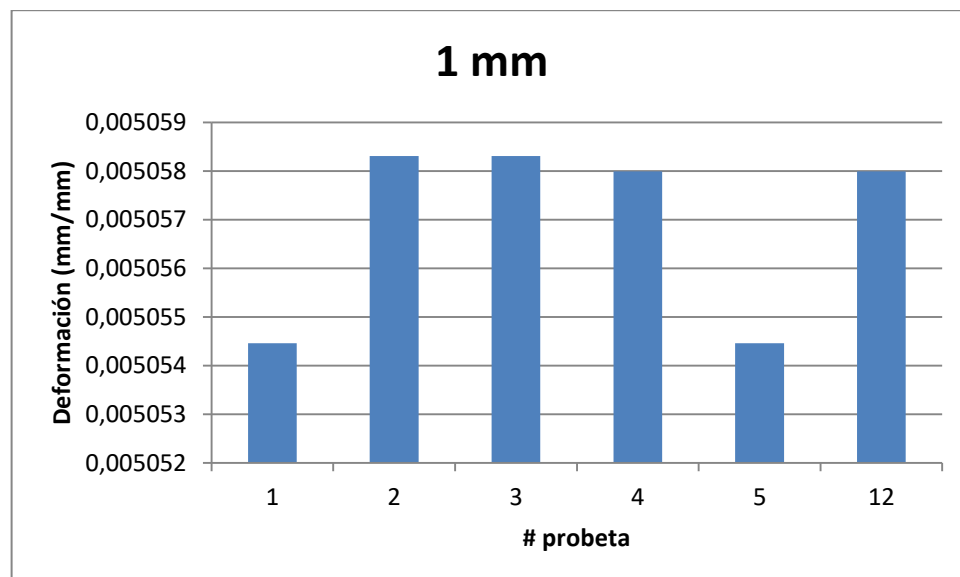
Figura 66. Esfuerzo de von-Mises con soporte automático.



Fuente: elaboración propia.

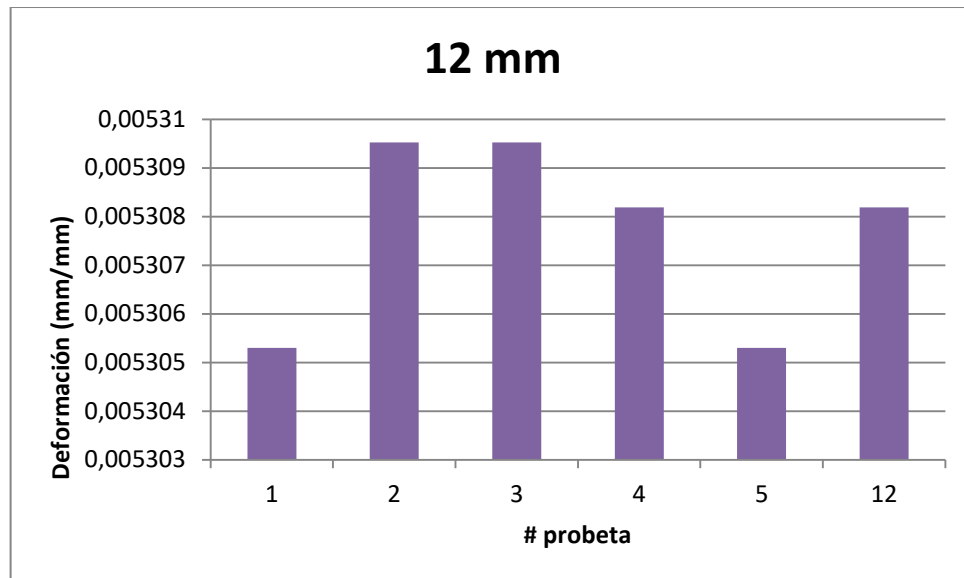
En la simulación con soportes automáticos también se realizaron las mismas seis simulaciones con los diferentes parámetros, utilizando espesor de 1 mm como se ve en la Gráfica 27.

Gráfica 27. Deformación de las probetas espesor 1 mm.



Y seis simulaciones con soporte automático con el espesor de 12 mm (Gráfica 28) como fue fabricada experimentalmente la probeta.

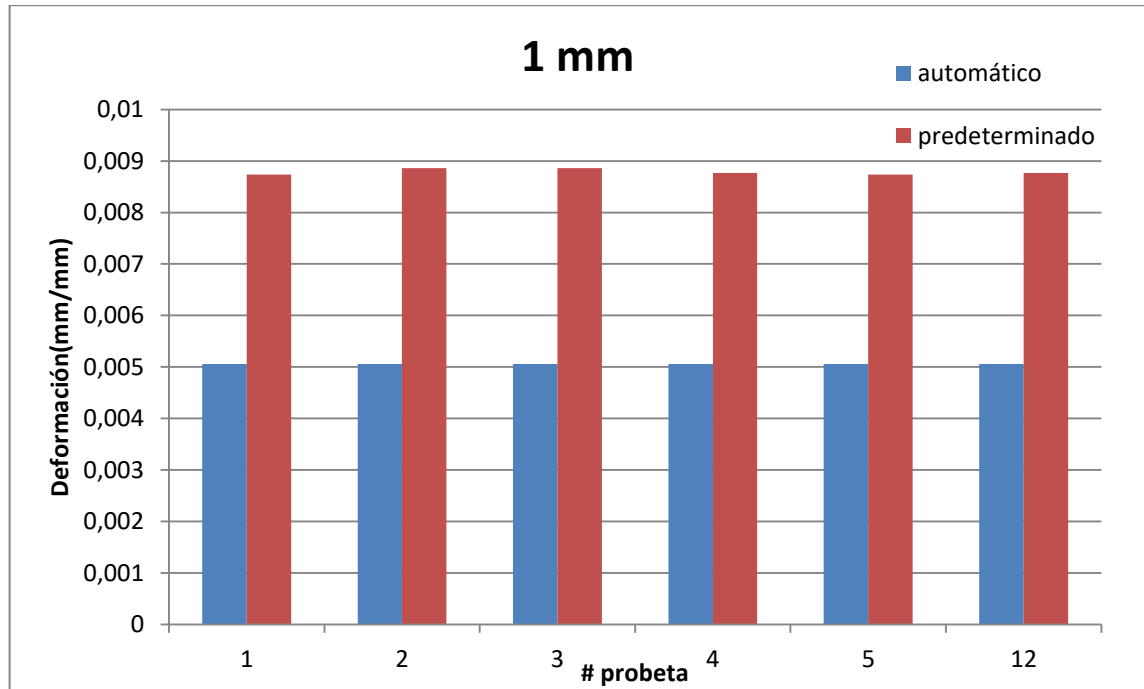
Gráfica 28. Deformación de las probetas espesor 12 mm.



6.3.2.3 Deformación por soporte.

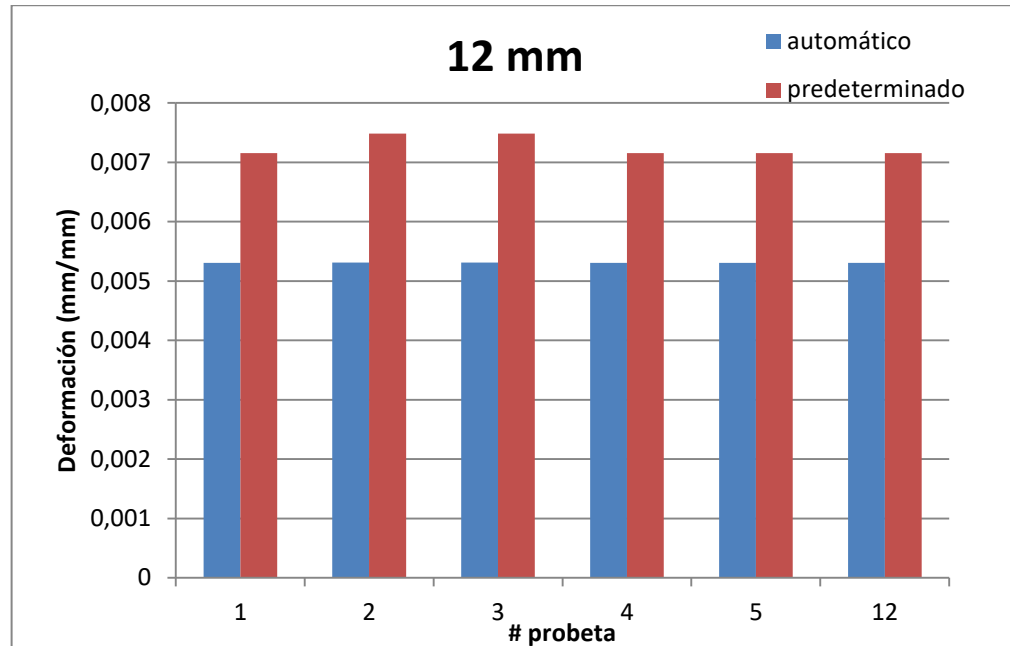
En la Gráfica 29 se puede observar la deformación en las diferentes simulaciones con la variación de los parámetros para espesor de 1 mm, las azules son con soporte automático y las rojas con soporte predeterminado.

Gráfica 29. Comparación de la deformación con los dos tipos de soportes para espesor 1 mm.



Por otro lado, para las simulaciones de espesor 12 mm se gráfica la deformación para cada uno de los parámetros con las tres diferentes probetas, las azules son las de soporte automático y las rojas son de soporte predeterminado como se observa en la Gráfica 30.

Gráfica 30. Comparación de la deformación con los dos tipos de soportes para espesor 12 mm.



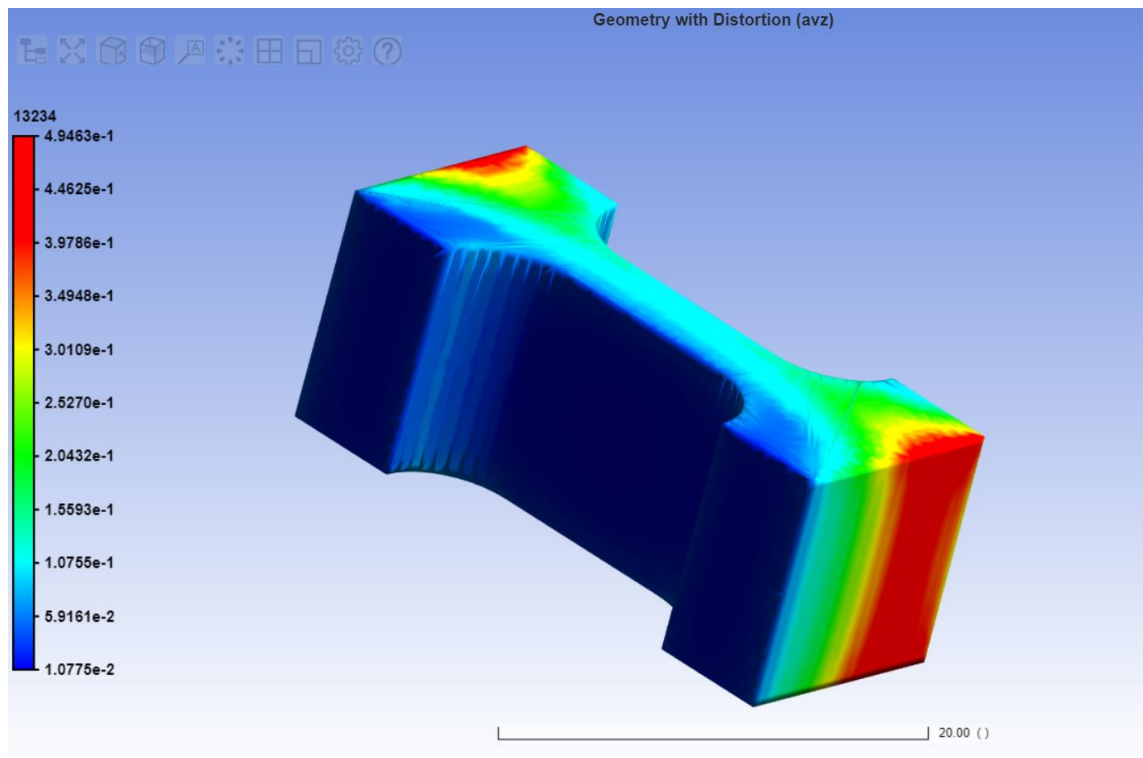
6.3.1 Simulación Ansys Additive.

Se realizó una simulación para tres probetas donde se varió el material y la geometría como se puede observar a continuación.

6.3.1.1 Probeta 2.

La probeta número 2 en ANSYS Additive da como resultado una simulación de deformación; donde, la mayor deformación que es de 0,494 mm/mm se genera en los extremos de la probeta y la menor deformación es de 0,01077 mm/mm como se puede ver en la Figura 67.

Figura 67. Deformación probeta 2.

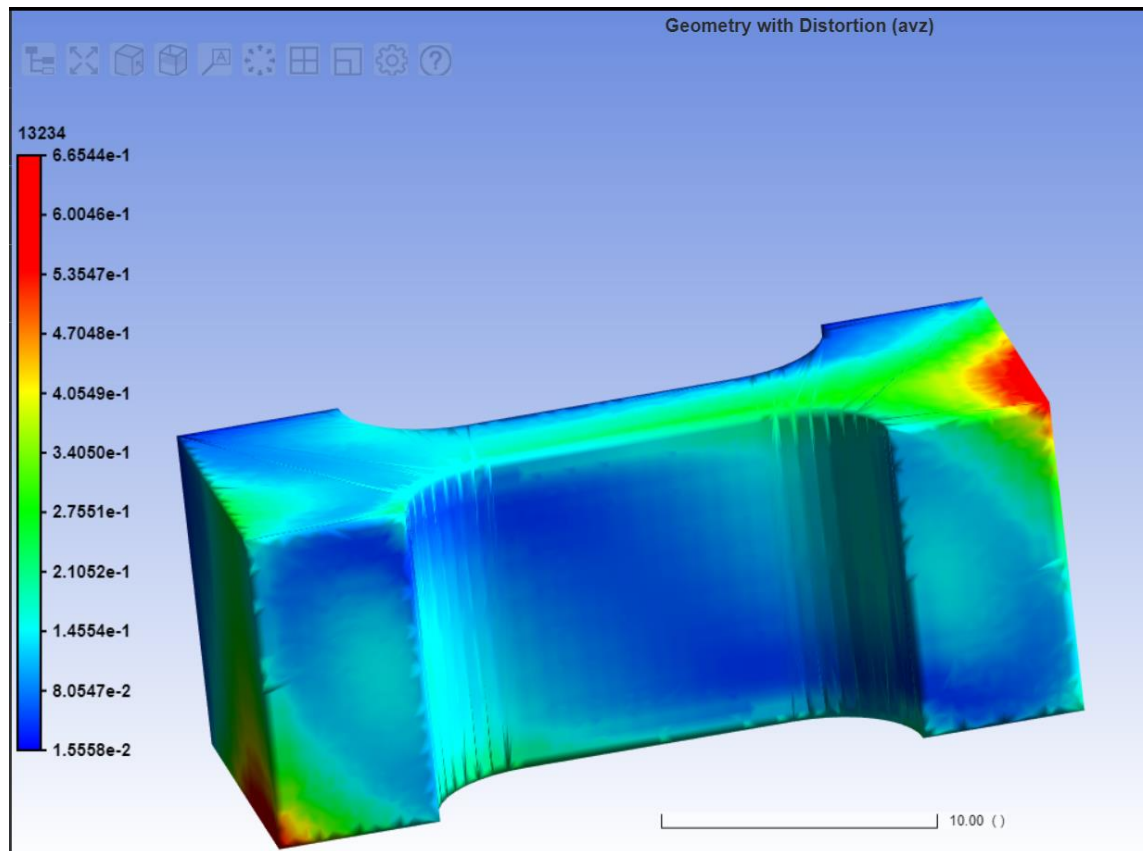


Fuente: elaboración propia.

6.3.1.2 Probeta 3.

En la Figura 68, se observa los resultados de la simulación de deformación para la probeta 3; donde, la máxima es de 0,6654 mm/mm y la mínima es de 0,01556 mm/mm.

Figura 68. Deformación probeta 3.

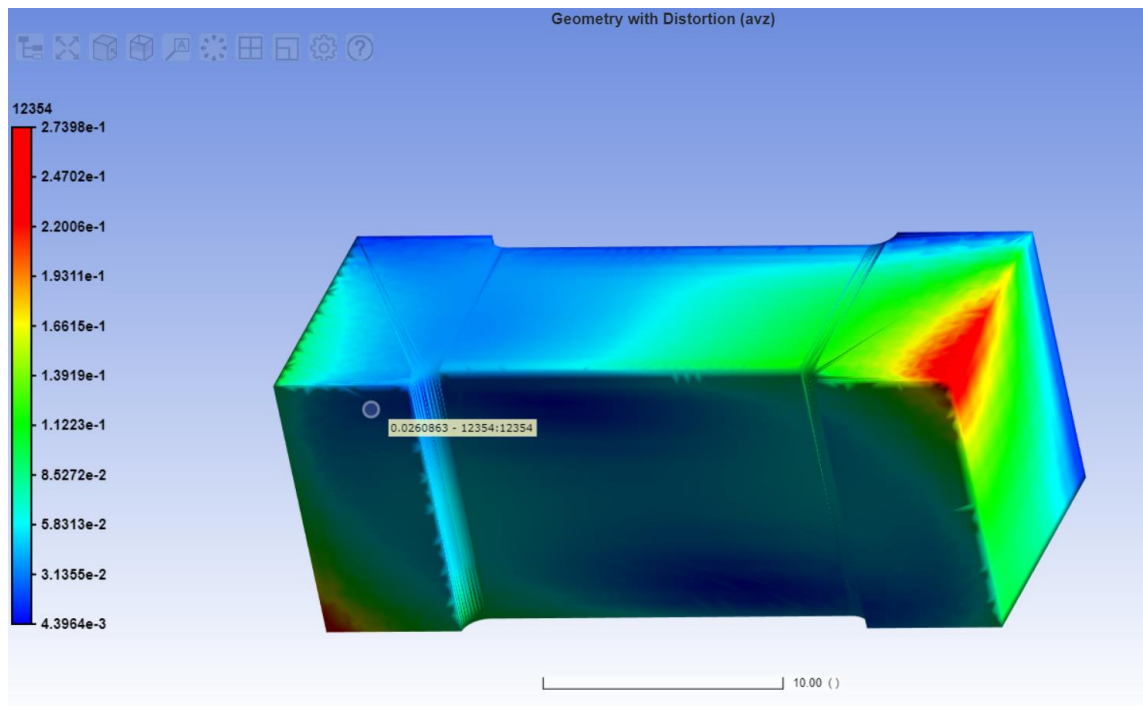


Fuente: elaboración propia.

6.3.1.3 Probeta 5.

La probeta número 5, da como resultado una simulación de deformación; donde, la mayor deformación que es de 0,2739 mm/mm se genera en los extremos de la probeta y la menor deformación es de 0,04396 mm/mm como se puede ver en la Figura 69.

Figura 69. Deformación probeta 5.



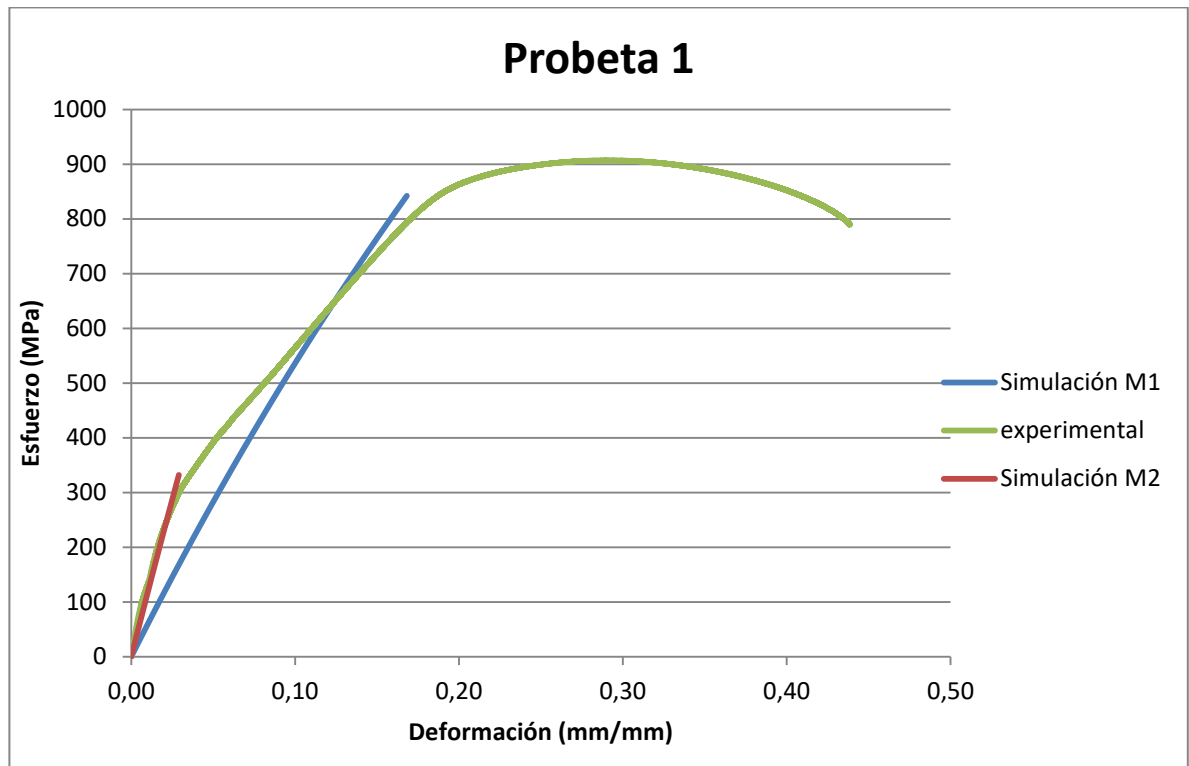
Fuente: elaboración propia.

6.4 VALIDACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

6.4.1 Probeta 1.

En la Gráfica 31 se puede observar la gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 1; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul.

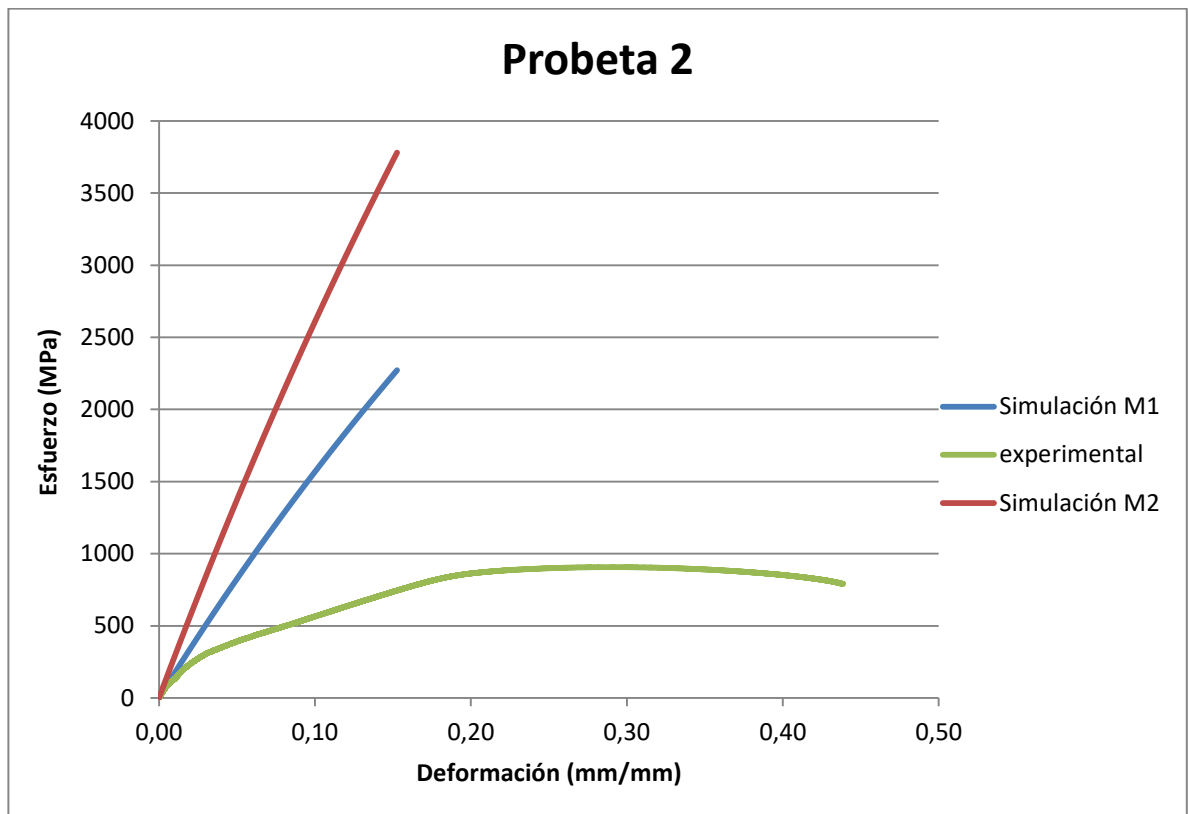
Gráfica 31. Validación de la probeta 1.



6.4.2 Probeta 2.

La gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 2; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul como se muestra en la Gráfica 32.

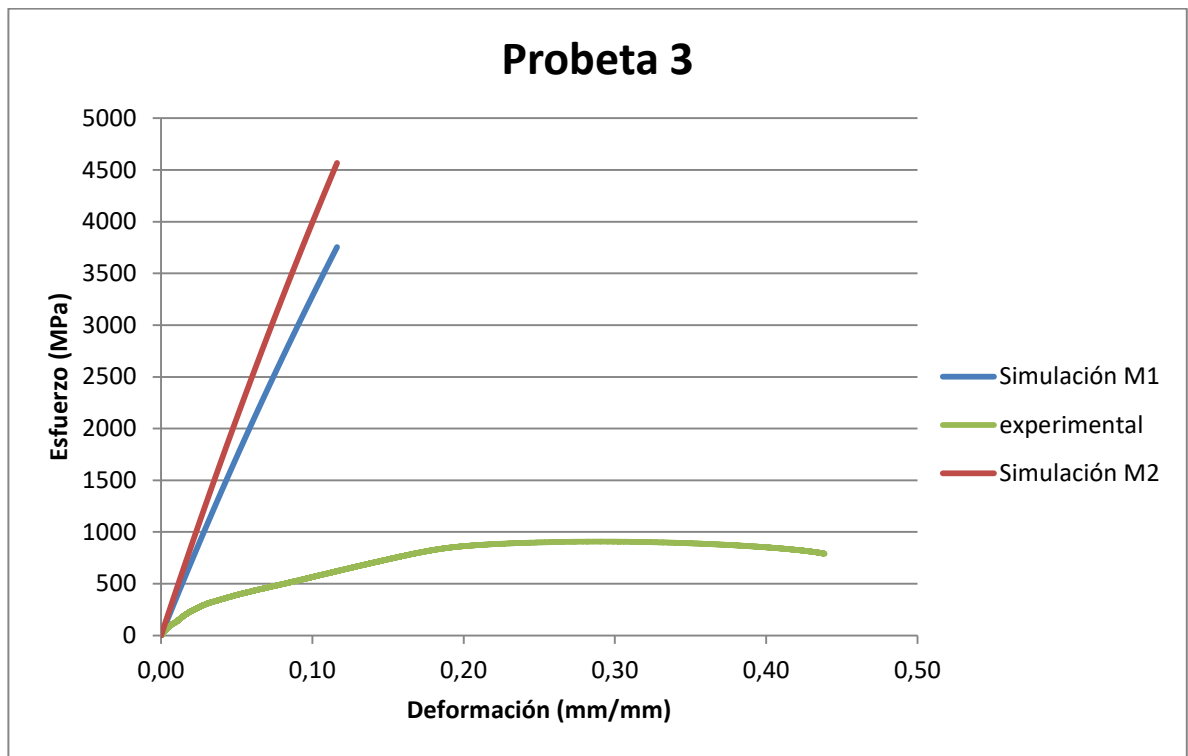
Gráfica 32. Validación de la probeta 2.



6.4.3 Probeta 3.

En la Gráfica 33 se puede observar la gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 3; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul.

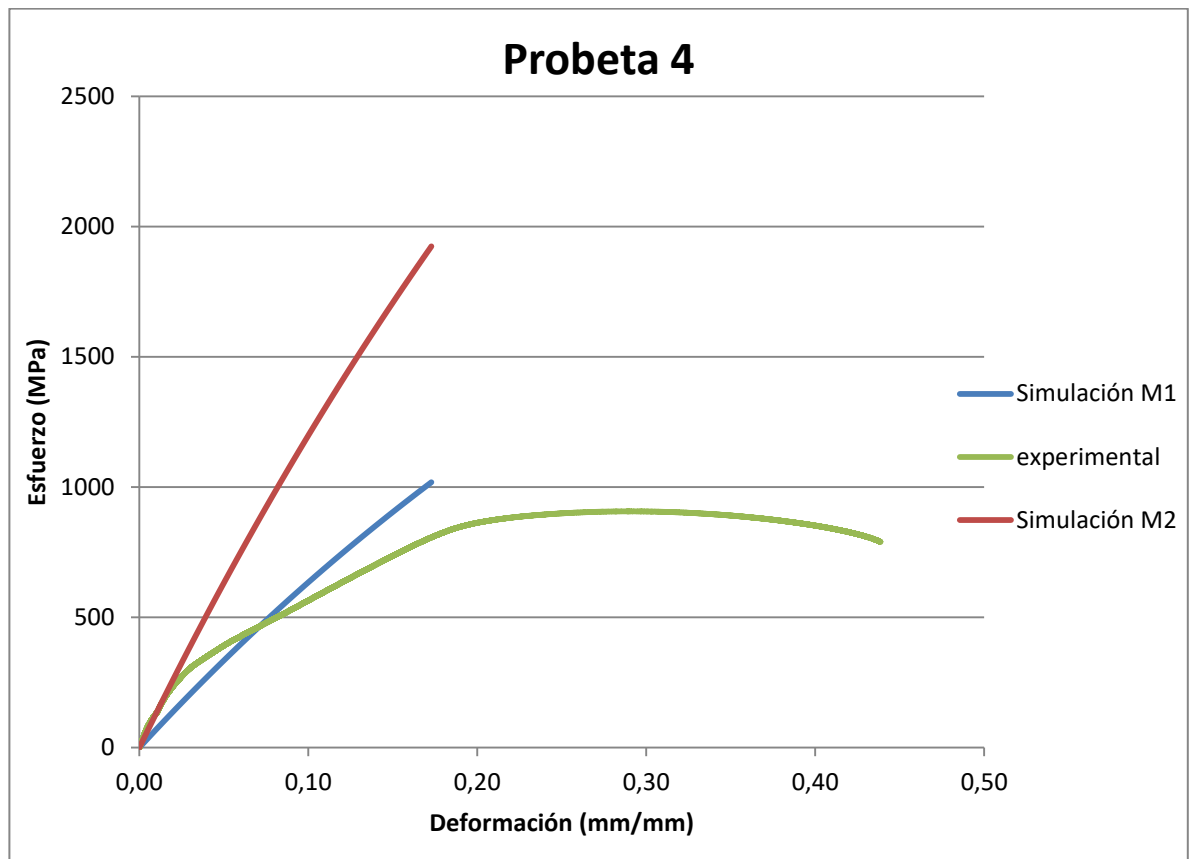
Gráfica 33. Validación de la probeta 3.



6.4.4 Probeta 4.

La gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 4; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul como se muestra en la Gráfica 34.

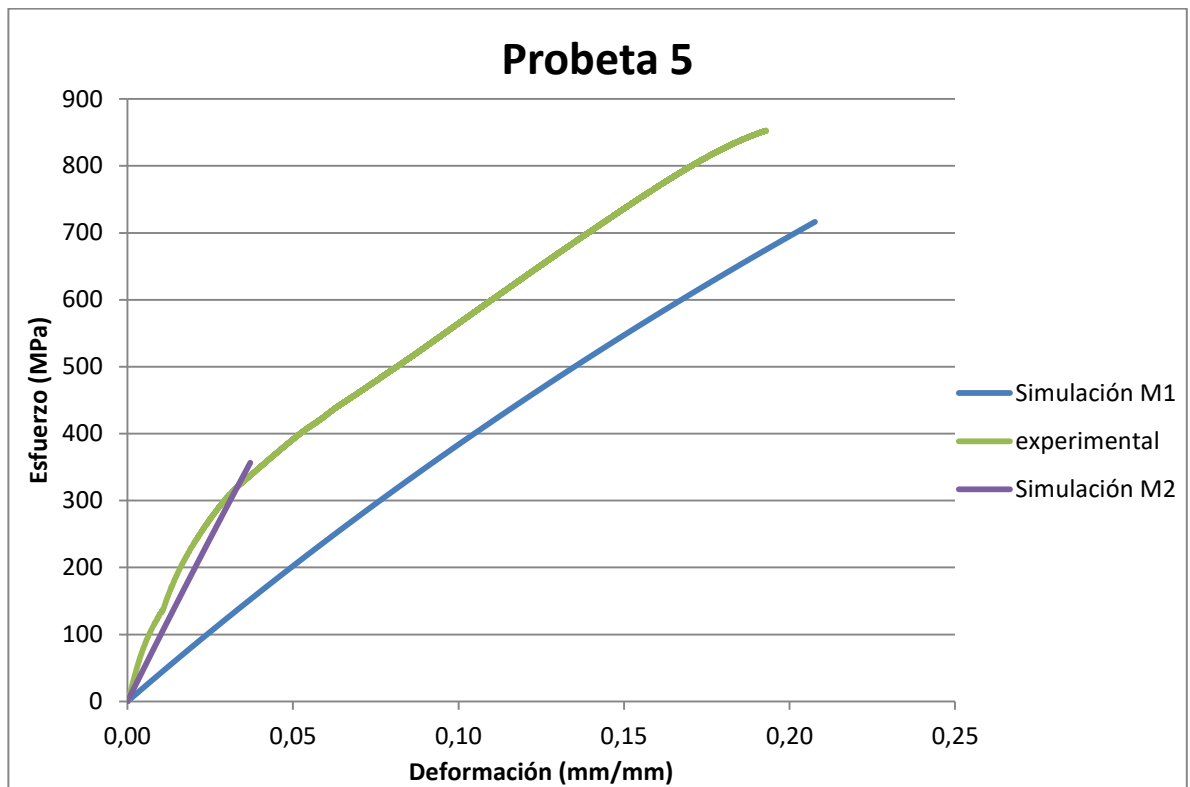
Gráfica 34. Validación de la probeta 4.



6.4.5 Probeta 5.

En la Gráfica 35 se puede observar la gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 5; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se gráfica en color morado y para el primer módulo de elasticidad en azul.

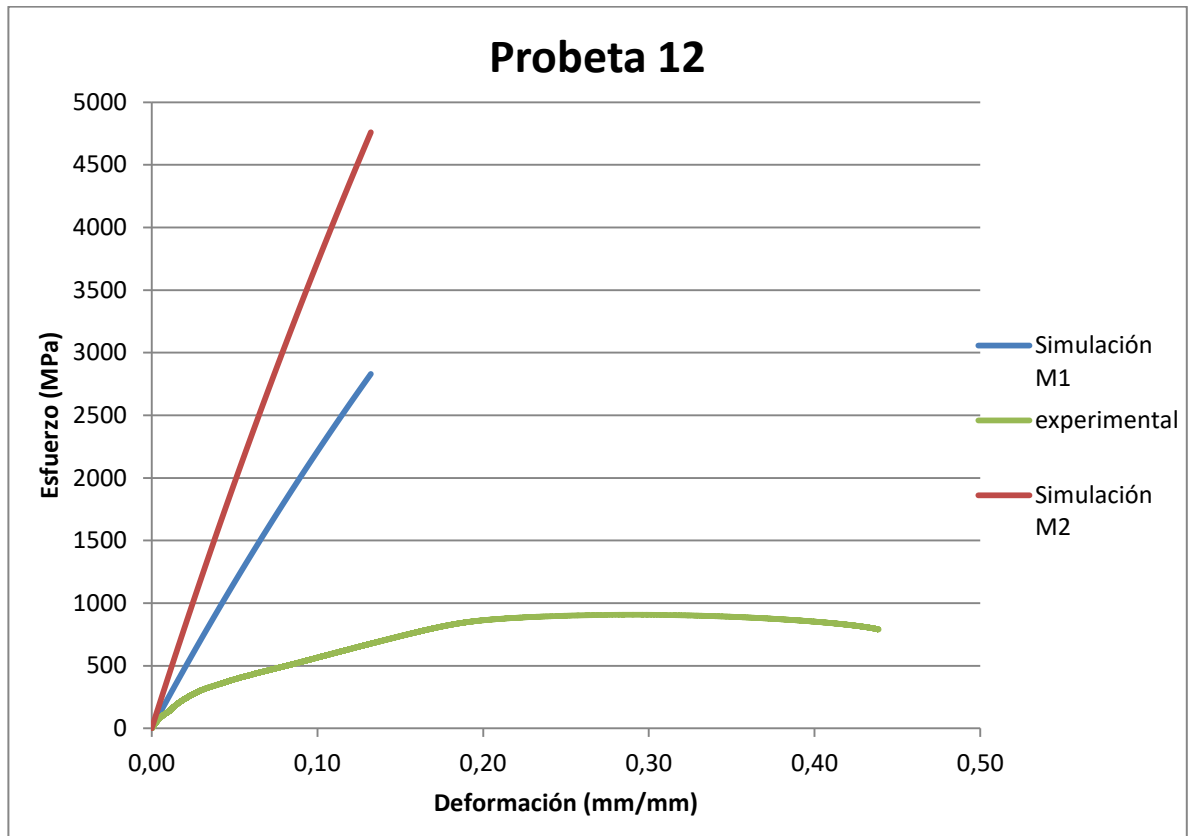
Gráfica 35. Validación de la probeta 5.



6.4.6 Probeta 12.

La gráfica esfuerzo – deformación de la probeta 12; donde, los datos experimentales de tensión es la de color verde, las simulaciones con el módulo de elasticidad 2 para la primera pendiente se grafican en rojo y para el primer módulo de elasticidad en azul como se muestra en la Gráfica 36.

Gráfica 36. Validación de la probeta 12.



7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 LAS VARIABLES IMPORTANTES DE LA SIMULACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA

Las variables más importantes de la simulación de manufactura aditiva, en relación a la eficiencia y la aplicabilidad industrial son el ángulo de fabricación, la potencia, la velocidad y diámetro del láser.

Estas variables en concreto, son las que afectan las propiedades mecánicas del material, más específicamente afectan directamente el calentamiento y enfriamiento de la pieza y es el causante de la deformación térmica; el cual genera baja calidad y propiedades mecánicas en los componentes.

7.2 DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS POR ENSAYO EXPERIMENTAL DE TENSIÓN

Las propiedades mecánicas como es el módulo de elasticidad, límite de elasticidad y esfuerzo último, obtenido por ensayos experimentales de las probetas fabricadas por cama de polvo, no fueron las mejores o las más ideales para cumplir los requerimientos de cualquier aplicación industrial.

El módulo de elasticidad es bastante pequeño, esto se debe principalmente a los parámetros del proceso y la generación de esfuerzos residuales derivados de la deformación.

También, se debe que el módulo de elasticidad es muy bajo, porque en la fabricación aditiva la unión entre capas, existen espacios denominados poros y por esto es poca la capacidad de elasticidad.

Por otra parte, el ángulo de fabricación afecta las propiedades mecánicas, al fabricar las probetas con un ángulo de 0° , la unión entre capas es de forma horizontal y al realizar los ensayos de tensión, las fuerzas se ejercen en el sentido vertical con coordenada Y, esto genera efecto en la separación de las capas; igual que para 45° , pero a diferencia de 0° , las fuerzas son menores al separar las capas.

Los resultados obtenidos se deben principalmente a los parámetros del proceso y generación de esfuerzos residuales derivados de la deformación. El comportamiento a tensión de este material en condición de fabricado, lo deben

mucho a la composición química del polvo. La composición química compleja puede incluir más martensita o más ferrita y con alto % de austenita.

La investigación de Murr et al., mostro que la fabricación aditiva de polvo de acero inoxidable 17-4PH con gas argón (Ar), tuvo resultados de una microestructura totalmente martensítica (Murr et al., 2012). Sin embargo; estudios recientes con las misma características de Ar, dan como resultado una formación de martensita y austenita (Eskandari et al., 2022).

La diferencia del comportamiento de la microestructura se debe a la variación de la composición química y las condiciones de construcción que son, los parámetros de la máquina y la geometría de la pieza, generando otros historiales térmicos en la fabricación.

En la gráfica esfuerzo – deformación de los ensayos experimentales de tensión de la sección 6.2.1, la línea continua tiene un comportamiento anormal; es decir, tiene dos pendientes en la zona elástica. Este comportamiento se debe a la microestructura del acero inoxidable donde se puede tener martensita con austenita retenida; si bien; el acero inoxidable 17-4 endurecido por precipitado tiene matriz martensítica con austenita retenida que es metaestable.

Además; el comportamiento de las gráficas se debe aún cambio en la composición química; también, por los esfuerzos residuales y la segregación heterogénea en toda la muestra por los ciclos térmicos y las tasas de enfriamiento.

Es decir, que la austenita metaestable puede transformarse en martensita a temperatura ambiente, debido al esfuerzo aplicado y la deformación generada; este proceso se llama transformación de la martensita y se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables.

Por lo tanto, en la segunda pendiente de las gráficas lo que se puede observar, es el papel que desempeña la transformación martensítica, retardando la falla final del acero; es decir, transforma la microestructura a temperatura ambiente para mejorar las propiedades mecánica de las probetas.

7.3 SIMULACIÓN DE ENSAYO DE TENSIÓN

En las simulaciones en ANSYS MECHANICAL se incluyeron las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos experimentales de tensión, como parámetro de entrada: el módulo de elasticidad y límite de elasticidad para calcular la gráfica esfuerzo - deformación y posteriormente comparar con los ensayos experimentales.

Además, se realizaron simulaciones con las probetas como sólidos, ya que los archivos .stl no se dejaron simular debido a la poca capacidad de los computadores de la Universidad de Pamplona.

Las simulaciones se realizaron por el método de elementos finitos, lo que significa que en cada nodo de la probeta tendrá las mismas propiedades mecánicas de entrada y se comporta como un material ideal isotrópico sin poros; pero en realidad, la pieza no es sólida sino a capas, con un comportamiento anisotrópico con poros.

Las simulaciones se realizaron lo más reales posibles a las experimentales, no se colocó un parámetro de gravedad porque la masa es despreciable a comparación a las cargas aplicadas.

El modelo de la simulación solo imitar los resultados prácticos en la zona elástica del material; es decir, el modelo solo puede trabajar con la deformación elástica y por lo tanto, solo puede obtener las propiedades mecánicas de las zona elástica.

7.4 VALIDACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN Y EL ENSAYO A Tensión

Como se pudo observar en los resultados al validar los ensayos experimentales con las simulaciones se obtuvo que todas las probetas tienen un comportamiento diferente con el mismo modelo de simulación.

Esto puede deberse a que las simulaciones se hicieron de forma que el material se comporta como sólido, ya que las simulaciones con formato .stl que simula un comportamiento capa a capa de la pieza, no se pudieron realizar.

También se debe a que las probetas se fabricaron con ángulos diferentes; es decir, que el modelo que se planeó para las simulaciones de los ensayos a tensión no se adapta a cualquier ángulo de fabricación de las piezas.

Además, las gráficas esfuerzo – deformación experimentales tienen dos pendientes diferentes en la zona elástica; es decir, que tienen dos pendientes diferentes; lo que dificultó la exactitud de las simulaciones.

Para la probeta 1 y 4, las simulaciones tienen a ser parecida con la experimental solo en la primera pendiente; es decir, cuando se emplea el segundo módulo de la primera pendiente de la gráfica experimental; mientras que para la segunda pendiente que emplea el modulo uno, no corresponde la simulada con la experimental.

La probeta 2, 3 y 12 no son coherentes en la tendencia de las simulaciones con la experimental; por otro lado, la simulación de la probeta 5, si es coherente con la experimental como se puede observar en la Gráfica 35.

Esto se debe a las condiciones de fabricación de la probeta 5, los cuales son: el espesor y el ángulo de fabricación; al tener las propiedades mecánicas más altas, las simulaciones son más exactas.

El límite elástico y el módulo de elasticidad de la primera pendiente en la simulación, se acerca bastante a la experimental y para la segunda pendiente el módulo de elasticidad tienen la misma pendiente pero el límite de elasticidad no coincide.

7.5 EFECTO DEL ÁNGULO DE FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS PROBETAS

El ángulo de fabricación es uno de los parámetros más importantes en la fabricación por cama de polvo, porque de este dependen las propiedades mecánicas de la pieza, y su buen funcionamiento y vida útil en la aplicación industrial.

Las diferentes probetas obtuvieron diferentes propiedades mecánicas, por el ángulo de fabricación con el que fueron elaboradas, el mayor módulo de elasticidad fue el de la probeta número 5 que fue fabricada con ángulo de 45° , que arrojó un módulo de elasticidad de 259,05 GPa y el menor fue el de la probeta 1 con módulo de 16,7 GPa con ángulo de 0° .

Para el Yield strength el mayor fue el de la probeta 5 que fue de 872,43 MPa fabricada con ángulo de 45° y el menor fue el de 2 con 755,89 MPa fabricada con ángulo 0° ; esto quiere decir, que para el ángulo de fabricación de 0° las propiedades mecánicas son menores que para el de 45° .

7.6 SIMULACIÓN DE FABRICACIÓN POR CAMA DE POLVO

La simulación de la fabricación aditiva en el Workbench no se puede utilizar para analizar componentes como juntas o fracturas; los elementos a simular en la extensión aditiva, se deben modelar en SpaceClaim primero.

Se tuvieron seis diferentes parámetros para tres diferentes geometrías de probetas; en las cuales, se quiso investigar cuales parámetros eran mejores en cuanto a la deformación generada por las fabricaciones.

Para las simulaciones con los soportes predeterminados; es decir, soporte hecho manualmente se obtuvo que la temperatura del ambiente de fabricación varía en un grado, a diferencia que con soporte automático que la temperatura no varía.

Además, la deformación máxima fue mayor en las simulaciones con soporte predeterminado generada entre el soporte y la probeta, que con soporte automático que se generó en los extremos de la probeta.

La deformación elástica máxima fue menor en la simulación con soportes automáticos generada en las primeras capas del soporte, que en la predeterminada generada entre la probeta y el soporte. Por último, el esfuerzo máximo fue mayor la probeta con soporte predeterminado que el automático.

Por otro lado, la Gráfica 25 del soporte predeterminado muestra que para las probetas 4 y 5, la deformación es menor a 0,00715 mm/mm y mayor para las probetas 2 y 3 que es más de 0,0074 mm/mm para el espesor de 12 mm.

Para el espesor de 1 mm, la deformación menor para la probeta 1 es de 0,00872 mm/mm y mayor para las probetas 2 y 3 con una deformación de 0,00886 mm/mm.

Para la Gráfica 27 del soporte automático de espesor 1 mm se puede analizar que hay menor deformación para las probetas 1 y 5 con 0,0050545 mm/mm y mayores para las probetas 2 y 3 con más de 0,005058 mm/mm.

Para 12 mm la deformación es menor en las probetas 1 y 5 con valor de 0,0053053 mm/mm y mayor para las probetas 2 y 3 con más de 0,005309 mm/mm; es decir, que la deformación es mayor, a mayor es el espesor; por lo tanto, la deformación depende de la cantidad de capas más no de la geometría de la pieza y la deformación disminuye con soporte que da el programa de forma automática.

7.7 SIMULACIÓN EN ANSYS ADDITIVE

Solo se pudieron realizar tres simulaciones en Ansys Additive, ya que el parámetro mínimo del módulo de elasticidad es de 45 Gpa y las probetas 1, 4 y 12 tienen un módulo de elasticidad menor a este.

En las simulaciones por ANSYS Additive se recomienda que el diámetro del láser sea entre 80 a 120 μm , para disminuir las deformaciones térmicas en los componentes; es decir, que al fabricar las probetas con un diámetro de 135 μm fue mayor la deformación térmica y por eso las probetas se pandearon o curvearon.

En los resultados obtenidos en estas simulaciones se pudo analizar que la probeta 5, fue la que obtuvo la menor deformación y se puede comparar que esta por ensayos experimentales fue la que obtuvo mejores propiedades mecánicas; es decir, que al obtener en las simulaciones menor deformación, las propiedades mecánicas aumentarán en el componente fabricado.

Por otra parte, se puede llegar a obtener las deformaciones térmicas de cualquier componente gracias a ANSYS Additive, antes de la fabricación de las piezas: lo cual, lleva a una reducción de los costos y desperdicio de material en el proceso de fabricación.

8. CONCLUSIONES

La investigación entre convenios de la Universidad y Centros de Investigación como es CIDESI, generan beneficios para todos; los estudiantes pueden desarrollar los conocimientos teóricos adquiridos, llevándolos a la práctica ingenieril y los Centros de Investigación obtienen recursos Humanos con la capacidad de desarrollar proyectos innovadores.

El presente proyecto tuvo como resultado un primer abordaje en el tema de manufactura aditiva de metales, más específicamente en fabricación y simulación por la técnica de cama de polvo; cabe resaltar que es poca la información e investigación relacionada a estos temas y más en la parte de simulación por cama de polvo.

Se realizó una investigación y un análisis profundo de cuáles eran los parámetros más importantes de la simulación de manufactura a la hora de la fabricación, son el ángulo de fabricación, la potencia, la velocidad y diámetro del láser, que afectan el comportamiento de la deformación térmica de la pieza a fabricar.

Por otro lado, la fabricación de las probetas por la técnica de cama de polvo se realizó en México, ya que nuestra universidad en Colombia no cuenta con la tecnología necesaria para el desarrollo experimental de este proyecto, actualmente la manufactura aditiva está en fase de investigación y poco son los conocimientos en el tema, este proyecto en uno de las primeras investigaciones, tanto en la parte experimental de fabricación por cama de polvo y simulación de manufactura aditiva.

Las propiedades mecánicas obtenida de los ensayos experimentales de tensión no fueron las mejores, ya que la composición química y el ángulo de fabricación de las probetas son las que más afecta en el proceso y por lo tanto, para las probetas fueron muy bajas el esfuerzo último, el límite y módulo de elasticidad.

Las gráficas de esfuerzo – deformación experimental tienen un comportamiento inusual en la zona elástica, esto se debe a la transformación martensítica de acero inoxidable, causada por la aplicación de esfuerzos en el ensayo de tensión; generando un aumento del módulo y limite elástico del material.

En el primer acercamiento de las simulaciones para la manufactura aditiva de metales, fue con la ayuda del Workbench de Ansys; donde, se realizaron

simulaciones de ensayos de tensión por el método de elementos finitos y como parámetro de entrada, el modulo y el límite de elasticidad obtenidos en los ensayos experimentales.

De las simulaciones de ensayo de tensión se obtuvo, que se debe sacar muy bien las propiedades mecánicas para que las simulaciones sean más reales y tiendan a parecerse con los ensayos experimentales.

También se demostró que solo se pueden realizar simulaciones con cuerpo sólidos, ya que al utilizar formatos que simulen el comportamiento capa a capa de la pieza, la capacidad de los computadores no es suficiente; pero como es un análisis de elementos finitos, el comportamiento de las propiedades mecánicas utilizados como entrada serán en cada nodo del cuerpo.

En conclusión, la validación de la simulación con la experimental de los ensayos a tensión de las probetas, el modelo empleado solo se ajusta al módulo de elasticidad y no al límite elástico para la probeta número 5, que tiene el ángulo de fabricación de 45° y espesor de 10 mm. Por lo tanto, se debe realizar más pruebas experimentales con el ángulo de fabricación para mejorar el método de simulación.

Además, como es el primer acercamiento a la técnica de cama de polvo, hay poco conocimiento al respecto, en la parte de simulación de manufactura aditiva como es una nueva tecnología, no hay equipos con la capacidad para desarrollarlas ni apoyo técnico, lo que dificultó la investigación del proyecto.

Se puede concluir, que para el ángulo de fabricación de 90°, las propiedades mecánicas serán mejores, que para otros ángulos como es el de 0° y 45°, porque las fuerzas aplicadas serán en el mismo sentidos que las fibras, a diferencia que para otros ángulos al ser perpendicular, tendera a separar las capas y como resultado tener menores propiedades mecánicas.

Cabe resaltar, que al realizar simulaciones con soportes automáticos, las deformaciones en la fabricación aditiva de las probetas, es menor a comparación de las simulaciones con la creación automática de los soportes. Además, de disminuir la deformación, los soportes creados de forma automática por el software se pueden exportar a la máquina, disminuyendo los tiempos en el diseño de las piezas antes de la fabricación.

El programa ANSYS Additive ayuda a predecir la deformación térmica antes de la fabricación experimental, lo que ayuda a disminuir estas deformaciones al variar los parámetros de proceso antes de fabricar. Al disminuir estas deformaciones se

mejoran las propiedades mecánicas, lo que se obtiene una reducción de los costos y tiempos de fabricación.

Este proyecto aportó las primeras bases en la investigación, sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable 17-4 PH fabricado por la técnica de cama de polvo y simulaciones para la manufactura aditiva de metales por la misma técnica. Un acercamiento a la simulación de la fabricación aditiva capa a capa, a la simulación de deformaciones térmicas de piezas, ocasionadas por los parámetros de la máquina y las propiedades mecánicas del material. Además, un primer contacto del comportamiento de las propiedades mecánicas del acero inoxidable 17-4 PH fabricado por la técnica de cama de polvo, al variar el ángulo de fabricación.

9. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda a la Universidad de Pamplona, dar apoyo a la investigación del programa de Ingeniería Mecánica en enfoque a la manufactura aditiva de metales, ya que es un proceso innovador y potenciador de la industria; el cual, es la mejor inversión a futuro.

Por lo tanto, se requiere un laboratorio de alta tecnología con equipos físicos para la manufactura aditiva de metales y equipos computacionales para simulaciones; así, mejorar los resultados en las investigaciones.

Se recomienda no guardar todas las simulaciones en un solo archivo, porque se puede dañar el formato y perder todo el trabajo; en las simulaciones, a veces tienden a dañarse durante el proceso, por eso se recomienda guardar la geometría aparte por si esto llegara a suceder. Además, para no perder exactitud en el proceso, es mejor hacer las piezas en DesignModeler y entre mejor se refine la malla o entre más pequeña es, más exactos va a ser los resultados.

Se sugiere sacar correctamente las propiedades del material; además, si la gráfica de esfuerzo – deformación experimental tiene dos pendientes en la zona elástica, se debe sacar el modulo elástico y el limite elástico para las dos pendientes para realizar las simulaciones.

Por otra parte, se recomienda una mayor capacidad de cómputo para las simulaciones; el procesador debe ser mayor a un CORE i7 de 8th generación o sus semejantes, de más de 16 núcleos, más de 70 Gb de RAM y más de 1 Tb de disco solido con tarjeta gráfica.

Se aconseja fabricar las piezas con soportes automáticos para disminuir las deformaciones generadas; al incluir la simulación en los procesos de la manufactura aditiva, se puede disminuir los defectos antes de la fabricación de los componentes por la técnica de cama de polvo.

Se sugiere fabricar probetas con ángulo de fabricación de 90°, para analizar si el método de las simulaciones se puede acoplar a este ángulo de fabricación.

Se recomienda para trabajos de simulaciones futuras, realizar la malla por programación con las menores dimensiones para resultados exactos, porque la malla es lo más importante en las simulaciones.

Además, se podría profundizar en la microestructura de las fabricaciones por cama de polvo, se debe realizar ensayos de metalografía, para observar los tamaños de granos y poder compararlos con simulaciones de microestructura.

Para trabajos futuros se recomienda trabajar un nuevo modelo en Ansys, que se pueda adaptar para simular el comportamiento de la zona plástica de los metales para manufactura aditiva.

Se aconseja para ensayos experimentales de tensión posteriores, realizar mínimo tres ensayos de tensión por cada pieza, para obtener un promedio de cada probeta.

Para que sea una buena validación de las propiedades mecánicas de la fabricación por cama de polvo, se sugiere realizar simulaciones con .stl para comprobar si por este método las gráficas esfuerzo – deformación son más exactas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansys. (2021). *Additive User's Guide (Print and Science)*. January. https://storage.ansys.com/mbu-assets/additive/Calibration/202/ANSYS_Additive_Calibration_Guide_2020_R2.pdf
- Bihr, M., Allaire, G., Betbeder-Lauque, X., Bogosel, B., Bordeu, F., & Querois, J. (2022). Part and supports optimization in metal powder bed additive manufacturing using simplified process simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 395, 114975. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114975>
- Čapek, J., Polatidis, E., Casati, N., Pederson, R., Lyphout, C., & Strobl, M. (2022). Influence of laser powder bed fusion scanning pattern on residual stress and microstructure of alloy 718. *Materials and Design*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110983>
- Cardeal, G., Sequeira, D., Mendonça, J., Leite, M., & Ribeiro, I. (2021a). Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts. *Procedia CIRP*, 98, 211–216. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2021.01.032>
- Cardeal, G., Sequeira, D., Mendonça, J., Leite, M., & Ribeiro, I. (2021b). Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts. *Procedia CIRP*, 98, 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.032>
- Composition, C. (n.d.). *Fe 55,847*.
- De Ciurana, J., Serenó, L., & Vallès, È. (2013). Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture. *Procedia CIRP*, 5, 152–157. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2013.01.031>
- du Plessis, A., Razavi, S. M. J., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M., Watson, M., Bhate, D., & Berto, F. (2022). Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. *Progress in Materials Science*, 125(December 2021), 100918. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- Eskandari, H., Lashgari, H. R., Ye, L., Eizadjou, M., & Wang, H. (2022). Microstructural characterization and mechanical properties of additively manufactured 17–4PH stainless steel. *Materials Today Communications*, 30(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103075>

Het, Z. (n.d.). *standard test method for young modulu*.

Jam, A., du Plessis, A., Lora, C., Raghavendra, S., Pellizzari, M., & Benedetti, M. (2022). Manufacturability of lattice structures fabricated by laser powder bed fusion: A novel biomedical application of the beta Ti-21S alloy. *Additive Manufacturing*, 50(December 2021), 102556. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102556>

Korkmaz, M. E., Waqar, S., Garcia-Collado, A., Gupta, M. K., & Krolczyk, G. M. (2022). A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.085>

Krishna, L. S. R., & Srikanth, P. J. (2021). Evaluation of environmental impact of additive and subtractive manufacturing processes for sustainable manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3054–3060. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.060>

Li, K., Zhan, J., Yang, T., To, A. C., Tan, S., Tang, Q., Cao, H., & Murr, L. E. (2022). Homogenization timing effect on microstructure and precipitation strengthening of 17–4PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 52(November 2021), 102672. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102672>

Liu, Z., Zhao, D., Wang, P., Yan, M., Yang, C., Chen, Z., Lu, J., & Lu, Z. (2022). Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science & Technology*, 100, 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.011>

Lough, C. S., Liu, T., Wang, X., Brown, B., Landers, R. G., Bristow, D. A., Drallmeier, J. A., & Kinzel, E. C. (2022). Local prediction of Laser Powder Bed Fusion porosity by short-wave infrared imaging thermal feature porosity probability maps. *Journal of Materials Processing Technology*, 302(December 2021), 117473. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117473>

Mayer, T., Brändle, G., Schönenberger, A., & Eberlein, R. (2020). Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts. *Heliyon*, 6(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03987>

Moshiri, M., Charles, A., Elkaseer, A., Scholz, S., Mohanty, S., & Tosello, G. (2020). An industry 4.0 framework for tooling production using metal additive manufacturing-based first-time-right smart manufacturing system. *Procedia CIRP*, 93, 32–37. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.04.151>

Murr, L. E., Martinez, E., Hernandez, J., Collins, S., Amato, K. N., Gaytan, S. M., & Shindo, P. W. (2012). Microstructures and properties of 17-4 PH stainless

- steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 1(3), 167–177. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)
- Nie, M. H., Zhang, S., Wang, Z. Y., Zhang, C. H., Chen, H. T., & Chen, J. (2022). Effect of laser power on microstructure and interfacial bonding strength of laser cladding 17-4PH stainless steel coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 275(September 2021), 125236. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125236>
- Ntamo, D., Lopez-Montero, E., Mack, J., Omar, C., Highett, M. I., Moss, D., Mitchell, N., Soulatintork, P., Moghadam, P. Z., & Zandi, M. (2022). Industry 4.0 in Action: Digitalisation of a Continuous Process Manufacturing for Formulated Products. *Digital Chemical Engineering*, 3(February), 100025. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100025>
- Oliveira, J. P., LaLonde, A. D., & Ma, J. (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials and Design*, 193. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.108762>
- Pauzon, C., Mishurova, T., Evsevlev, S., Dubiez-Le Goff, S., Murugesan, S., Bruno, G., & Hryha, E. (2021). Residual stresses and porosity in Ti-6Al-4V produced by laser powder bed fusion as a function of process atmosphere and component design. *Additive Manufacturing*, 47(January), 102340. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102340>
- Pinto, R., & Gonçalves, G. (2022). Application of Artificial Immune Systems in Advanced Manufacturing. *Array*, 15(October 2021), 100238. <https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100238>
- Prabhu, R., Masia, J. S., Berthel, J. T., Meisel, N. A., & Simpson, T. W. (2021). Design and manufacturability data on additively manufactured solutions for COVID-19. *Data in Brief*, 36. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2021.107012>
- Sabooni, S., Chabok, A., Feng, S. C., Blaauw, H., Pijper, T. C., Yang, H. J., & Pei, Y. T. (2021). Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 46(June), 102176. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102176>
- Sanguedolce, M., Rotella, G., Saffioti, M. R., & Filice, L. (2021a). Functionalized additively manufactured parts for the manufacturing of the future. *Procedia Computer Science*, 180, 358–365. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.01.174>
- Sanguedolce, M., Rotella, G., Saffioti, M. R., & Filice, L. (2021b). Functionalized additively manufactured parts for the manufacturing of the future. *Procedia*

Computer Science, 180(2019), 358–365.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.174>

- Shigueoka, M. O., & Volpato, N. (2021). Expanding manufacturing strategies to advance in porous media planning with material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 38.
<https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101760>
- Shrinivas Mahale, R., Shamanth, V., Hemanth, K., Nithin, S. K., Sharath, P. C., Shashanka, R., Patil, A., & Shetty, D. (2021). Processes and applications of metal additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 2–7.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.298>
- Singh, P., M.Singari, R., & Mishra, R. S. (2021). A review of study on modeling and simulation of additive manufacturing processes. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.057>
- Smoqi, Z., Gaikwad, A., Bevans, B., Kobir, M. H., Craig, J., Abul-Haj, A., Peralta, A., & Rao, P. (2022). Monitoring and prediction of porosity in laser powder bed fusion using physics-informed meltpool signatures and machine learning. *Journal of Materials Processing Technology*, 304(December 2021), 117550.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117550>
- Wu, Y., Li, M., Wang, J., Wang, Y., An, X., Fu, H., Zhang, H., Yang, X., & Zou, Q. (2022). Powder-bed-fusion additive manufacturing of molybdenum: Process simulation, optimization, and property prediction. *Additive Manufacturing*, 58(July), 103069. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103069>
- Wu, Z., Asherloo, M., Jiang, R., Delpazir, M. H., Sivakumar, N., Paliwal, M., Capone, J., Gould, B., Rollett, A., & Mostafaei, A. (2021). Study of printability and porosity formation in laser powder bed fusion built hydride-dehydride (HDH) Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 47(April), 102323.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102323>
- Yan, Z., Liu, W., Tang, Z., Liu, X., Zhang, N., Li, M., & Zhang, H. (2018). Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing. *Optics and Laser Technology*, 106, 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.04.034>
- Yang, K. T., Kim, M. K., Kim, D., & Suhr, J. (2021). Investigation of laser powder bed fusion manufacturing and post-processing for surface quality of as-built 17-4PH stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 422(June), 127492.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127492>
- Yao, X. X., & Zhang, Z. (2022). Laser-particle interaction-based heat source model of laser powder bed fusion additive manufacturing. *Optics and Laser Technology*, 155(January), 108402.

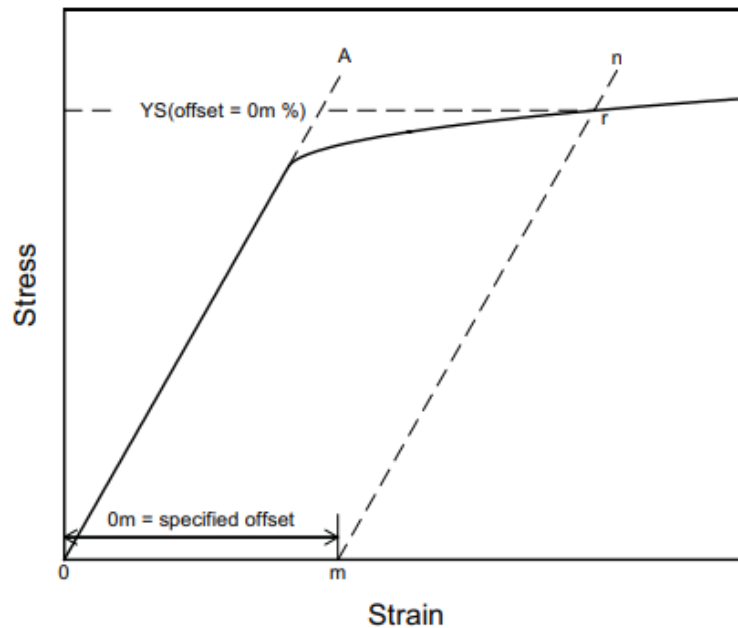
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108402>

11. ANEXOS

11.1 ANEXO 1

El método de compensación (offset), se utiliza para determinar el límite elástico, primero se deben buscar los datos de los cuales se van a graficar el esfuerzo – deformación. Luego de esto, se dibuja una línea paralela al 0,2 % para localizar el punto donde se cruzan, es el punto de fluencia como se observa en la Figura 70. Para sacar el módulo de elasticidad, se debe sacar la pendiente de la recta.

Figura 70. Gráfica del método offset.



Fuente: (Het, n.d.)