



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL BARRIDO LÁSER USADOS EN LA FABRICACIÓN DE MONOCAPAS DE UNA ALEACIÓN DE CU-SN-NI COMERCIAL Y EL EFECTO EN SU DENSIFICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS**

**MATÍAS CRISTIÁN SABELLE RAMÍREZ**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en ciencias de Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**JORGE RAMOS GREZ**

Santiago de Chile, (Agosto, 2016)

© 2016, Matías Cristián Sabelle Ramírez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL BARRIDO LÁSER USADOS EN LA FABRICACIÓN DE MONOCAPAS DE UNA ALEACIÓN DE CU-SN-NI COMERCIAL Y EL EFECTO EN SU DENSIFICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS**

**MATÍAS CRISTIÁN SABELLE RAMÍREZ**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**JORGE RAMOS GREZ**

**MAGDALENA WALCZAK**

**RODRIGO PALMA HILLERNS**

**JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en ciencias de Ingeniería

Santiago de Chile, (Agosto, 2016)

A mis padres, hermanos, amigos e  
hija, que me apoyaron, dieron fuerza  
y ánimo para terminar.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera comenzar por agradecer a mis padres Michel y Carmen, quienes me acompañaron, apoyaron y dieron animo durante todo el periodo que tardé en realizar esta investigación, y que me permitieron estudiar la carrera de mi vocación.

Me gustaría darles las gracias a todos mis amigos, familia e hija por haberme dado ánimo, escuchado y ayudado a despejarme en los momentos que no se veía claro como continuar la investigación.

También quisiera agradecer a mi profesor supervisor Jorge Ramos por haberme guiado y apoyado a lo largo del desarrollo de mi tesis y por haberme dado la oportunidad y confianza de realizar este estudio. A Don Patricio Pérez cuyos consejos, observaciones y buena disposición me ayudaron en momentos cruciales de mi investigación.

Aprovecho este momento para agradecer a todas las personas de la universidad que me enseñaron y ayudaron tanto: Luis Valdés, Marcelo, Nacho, Roberto, Parra, Enrique y Miguel Ángel.

Por último, agradecer a Timothy Gutowski y Timo SchuDe-Light por sus comentarios e interés en mi investigación, a CONICYT por el financiamiento entregado a través del proyecto Fondecyt Número 1130906 y a Ingeniería 2030 de Corfo.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
INDICE DE TABLAS .....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT .....	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación .....	2
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos principales.....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 Proceso de sinterizado.....	4
2.2 Interacción entre el láser y el polvo metálico.....	5
2.3 Sinterizado selectivo por láser .....	7
2.4 Distribución de temperaturas para una fuente de calor puntual.....	8
2.5 Polvo DirectMetal 20 .....	8
3. MARCO EXPERIMENTAL.....	10
3.1 Configuración experimental.....	10
3.2 Procedimiento experimental.....	12
3.2.1 Variación en las propiedades mecánicas al modificar la velocidad escaneo.....	12
3.2.2 Variación en las propiedades mecánicas al modificar la potencia del láser .....	14
3.3 Procedimientos previos a la obtención de resultados y experimentación	15
3.3.1 Caracterización del polvo metálico.....	15
3.3.2 Parámetros de operación del equipo .....	17

3.3.3	Medición diámetro del láser .....	19
3.3.4	Preparación de muestras para análisis metalográfico y obtención de imágenes .....	20
3.3.5	Estimación de la densidad energética .....	20
3.3.1	Distribución de temperaturas para una fuente de calor puntual....	21
3.4	Procedimientos para la obtención de resultados .....	23
3.4.1	Medición de espesor .....	23
3.4.2	Medición de densidad másica real .....	23
3.4.3	Medición de densidad másica relativa .....	23
3.4.4	Resistencia ultima a la tracción .....	24
3.4.5	Determinación de la tasa de derretimiento del polvo .....	24
3.4.6	Porosidad .....	26
4.	RESULTADOS .....	27
4.1	Probetas obtenidas.....	27
4.2	Resultados al variar la velocidad escaneo .....	29
4.2.1	Espesor.....	29
4.2.1	Densidad másica .....	32
4.2.1	Densidad másica relativa .....	33
4.2.1	Resistencia última a la tracción .....	35
4.2.1	Tasa de derretimiento del polvo .....	37
4.2.1	Porosidad .....	40
4.3	Resultados al variar la potencia de escaneo .....	44
4.3.1	Espesor.....	44
4.3.2	Densidad másica .....	44
4.3.3	Densidad másica relativa .....	45
4.3.4	Resistencia ultima a la tracción .....	46
4.3.5	Tasa de derretimiento del polvo .....	46
4.3.6	Porosidad .....	47
5.	DISCUSIÓN .....	49
5.1	Resultados obtenidos al variar la velocidad escaneo .....	49
5.2	Resultados obtenidos al variar la potencia de escaneo.....	51
6.	CONCLUSIÓN .....	54

BIBLIOGRAFIA .....	55
A N E X O S .....	59
ANEXO A: IMÁGENES CORTE TRANSVERSAL .....	60
ANEXO B: IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS.....	63
ANEXO C: IMÁGENES PROBETAS.....	64
ANEXO D: RESULTADOS NUMÉRICOS .....	68

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Propiedades reportadas de DM20 sinterizado (EOS GmbH, 2004). .....	9
Tabla 3-1: Parámetros utilizados.....	13
Tabla 3-2: Parámetros utilizados.....	15
Tabla 3-3: Concentración de cada elemento en DM20 sin considerar el porcentaje de carbono y oxígeno. ....	17
Tabla 3-4: Propiedades de los elementos metálicos que componen al DM20.....	17
Tabla 3-5: Velocidades según parámetro del equipo. ....	18
Tabla 3-6: Mediciones diámetro del láser.....	20
Tabla 3-7: Velocidad de avance según los parámetros utilizados.....	25
Tabla 4-1: Probetas sinterizadas a 25 y 50 mm/s y 190 W. ....	27
Tabla 4-2: Probetas sinterizadas a 80 mm/s a 190 W y 260 W.....	28



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Ventas de máquinas de prototipado rápido (Wohlers, 2000). .....	1
Figura 2-1: Cuello formando entre partículas de bronce con diámetro de 26 $\mu\text{m}$ sinterizadas a 800°C (Fang, 2010). .....	5
Figura 2-2: Penetración del haz láser (Jiang & Gutowski, 2015). .....	6
Figura 2-3: Distribución de la absorción del láser sobre una cama de polvo (Jiang & Gutowski, 2015). .....	6
Figura 2-4: Esquema de sinterizado indirecto (Eisen et al., 1998). .....	7
Figura 3-1: Cámara utilizada para generar las probetas. ....	11
Figura 3-2: Esquema de DMLS (Laohaprapanon et al., 2012). ....	11
Figura 3-3: Ejemplo de patrones de escaneo. ....	14
Figura 3-4: Procedimiento de escaneo (Despa & Gheorghe, 2011). ....	14
Figura 3-5: Sector de polvo analizado. ....	16
Figura 3-6: Espectro EDS del análisis químico semi-cuantitativo de DM20. ....	16
Figura 3-7: Relación entre parámetro del equipo y velocidad real. ....	18
Figura 3-8: Imagen superior de probeta. ....	19
Figura 3-9: Ejemplo del patrón de escaneo. ....	21
Figura 3-10: Comportamiento de la temperatura para el caso descrito, siendo la curva (b) generada utilizando la mitad de la potencia que para la curva (a). ....	22
Figura 3-11: Descripción de las velocidades. ....	24
Figura 3-12: Ejemplo de imagen procesada. ....	26
Figura 4-1: Imágenes del corte transversal. ....	29
Figura 4-2: Espesor de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W. ....	30
Figura 4-3: Espesor de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W. ....	31
Figura 4-4: Comparación de espesores de las probetas según la velocidad de escaneo sinterizadas a 190 W. ....	32

Figura 4-5: Densidad másica de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W. ....	32
Figura 4-6: Densidad másica relativa de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.....	33
Figura 4-7: Densidad másica relativa de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W.....	34
Figura 4-8: Densidad másica relativa de las probetas para distintas velocidades de escaneo sinterizadas a 190 W.....	34
Figura 4-9: UTS de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.....	35
Figura 4-10: UTS de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W. ....	36
Figura 4-11: UTS de las probetas para distintas velocidades de escaneo sinterizadas a 190 W.....	36
Figura 4-12: Gráfico tensión-deformación obtenido a una potencia de 190 W y una velocidad de escaneo de 25 mm/s, para (a) se utilizó un patrón de escaneo de 0°, para (b) de 30°, para (c) de 45° y para (d) de 60°.....	37
Figura 4-13: Tasa de derretimiento del material según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W. ....	38
Figura 4-14: Tasa de derretimiento del material según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W. ....	39
Figura 4-15: Tasa de derretimiento del polvo según la velocidad de escaneo sinterizadas a 190 W. ....	40
Figura 4-16: Porosidad en el segmento superior de probetas sinterizadas a 190 W.....	41
Figura 4-17: Porosidad en el segmento inferior de probetas sinterizadas a 190 W.....	42
Figura 4-18: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 25 mm/s y sinterizadas a 190 W.....	42
Figura 4-19: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 50 mm/s y sinterizadas a 190 W.....	43

Figura 4-20: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 80 mm/s y sinterizadas a 190 W.....	43
Figura 4-21: Comparación de espesor en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s. ....	44
Figura 4-22: Comparación de densidades másicas en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.....	45
Figura 4-23: Comparación de densidad másica relativa en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.....	45
Figura 4-24: Comparación de UTS en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s. ....	46
Figura 4-25: Comparación en la tasa de derretimiento en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.....	47
Figura 4-26: Comparación de porosidad en el segmento superior en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.....	47
Figura 4-27: Comparación de porosidad en el segmento inferior en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.....	48

## RESUMEN

La presente investigación se realizó para estudiar cómo afectan los parámetros seleccionados en el proceso de sinterizado selectivo por láser a las propiedades mecánicas y características de las piezas obtenidas.

El proceso de sinterizado láser fue realizado con un polvo metálico comercializado con el nombre de DirectMetal 20, el cual está constituido por cobre, níquel y estaño y es distribuido por la empresa EOS GmbH. Este polvo se introdujo en una cámara especialmente diseñada, la cual permite mantener una atmósfera mayoritariamente constituida de argón. Como fuente de calor se utilizó un láser de fibra de Nd:YAG. Los experimentos realizados consistieron en variar la velocidad de escaneo y potencia láser, utilizando, para todos los casos, distintos patrones de escaneo generando probetas de 62 mm de largo y 6 mm de ancho. A cada probeta plana se le registraron las medidas, peso y densidad másica, luego se determinó la resistencia última a la tracción (UTS, por sus siglas en inglés) por medio de un ensayo de tracción uniaxial. A las probetas con mayor UTS, para cada conjunto de parámetros, se les realizó un análisis metalográfico para medir la porosidad en las probetas.

Los resultados obtenidos muestran que tanto el patrón, velocidad y potencia de escaneo afectan las propiedades mecánicas y características de las probetas sinterizadas. A patrones de escaneo con líneas consecutivas más cortas se obtiene que aumenta la tasa de derretimiento, porosidad y espesor de las probetas, y que disminuye la densidad másica y la UTS. A mayor velocidad de escaneo se obtiene que la tasa de derretimiento aumenta junto con la densidad másica y la UTS, y que la porosidad y el espesor disminuyen, por último, el incremento de la potencia genera un aumento en la tasa de derretimiento, espesor, densidad másica y UTS, y disminuye la porosidad.

Palabras claves: Aleación Cu-Sn-Ni, porosidad, sinterizado selectivo por láser.

## ABSTRACT

This research was conducted to study how the parameters in the process of selective laser sintering (SLS) affect the mechanical properties of sintered parts.

The process of SLS was conducted with a metallic powder commercially available under the tradename of DirectMetal 20, which is composed by copper, nickel and tin and it is provided by EOS GmbH. The powder was placed in a specially designed chamber, allowing to maintain a controlled atmosphere composed mostly of argon. As a heat source, a 300 W Nd:YAG fiber laser was used.

Experiments consisted in varying the scanning speed and the laser power, using for all cases, different scanning patterns generating flat specimens 62 mm long and 6 mm wide. Each specimen was measured, weighed and the mass density was determined, then the ultimate tensile strength (UTS) was obtained by means of a uniaxial tensile test. The specimens with the highest UTS, for each combination of parameters selected, a metallographic analysis was performed to study their porosity.

The results show that the scanning patterns, speeds and power affect the mechanical properties of the sintered specimens. A scan patterns with shorter consecutive lines increases the rate of powder melting, porosity and thickness of the specimens, and decrease the mass density and UTS. At higher scanning speeds the rate of powder melting increases together with mass density and the UTS, the porosity and thickness decrease in this case. Finally, an increase in the power of the laser results in an increase of the rate of powder melting, thickness, mass density and UTS, and in a decreases of porosity.

Keywords: Cu-Ni-Sn alloy, selective laser sintering, porosity.

## 1. INTRODUCCIÓN

La manufactura por capas comenzó a fines de los años 80 (J. P. Kruth, 1991), y se desarrolló ampliamente desde 1994, teniendo un crecimiento exponencial (Wohlers, 2000), como se ve en la Figura 1-1. Desde entonces los mecanismos de consolidación de polvo mediante láser más comunes son el SLM y SLS (*Selective laser melting* y *sintering*) (J.-P. Kruth, Levy, Klocke, & Childs, 2007). El SLM y SLS son procesos similares, los cuales se diferencian en los parámetros utilizados al aplicar radiación láser sobre el material a procesar. El primero se suele realizar a bajas velocidades y alta potencia de escaneo, en comparación al SLS, con el fin de fundir el polvo metálico en su totalidad, en cambio el SLS compacta el polvo metálico sin fundirlo (AnVi, 2015). El SLM comenzó en 1995 en Fraunhofer Institute ILT en Aachen, Alemania (Stevenson, 2010) y el SLS se desarrolló en 1987 por Carl Dechard en la Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos de América (Casavola, Campanelli, & Pappalettere, 2008).



Figura 1-1: Ventas de máquinas de prototipado rápido (Wohlers, 2000).

Hoy en día la manufactura aditiva en metales se ha seguido desarrollando dado que permite construir piezas de cualquier complejidad directamente desde el polvo metálico

(Wang, 2008), que por procesos de mecanizado convencionales no se podrían lograr (Herderick, 2011). Pese a todo el esfuerzo que se ha dedicado a desarrollar esta tecnología, aun es necesario continuar estudiando el comportamiento de las microestructuras que se generan mediante estos procesos, generar bases de datos de procesamiento para distintos materiales y de las propiedades de estos para distintos parámetros y técnicas de procesamiento (Herderick, 2011).

### **1.1 Motivación**

Se espera que esta investigación incentive el estudio y desarrollo en tecnologías de manufactura aditiva de metales en Chile, ya que al ser una tecnología relativamente nueva quedan muchas aristas por ser estudiadas (Herderick, 2011), sobre todo si se desea construir piezas en tres dimensiones, aristas que pueden ser investigadas en Chile. Se decidió comenzar con la fabricación y estudio de monocapas para probar esta tecnología, para así, poder avanzar a múltiples capas.

Adicionalmente, se espera que los resultados obtenidos aporten información que relacione los parámetros de procesamiento con las propiedades mecánicas de las piezas generadas a partir del polvo metálico DirectMetal 20 (EOS GmbH, 2004), esto debido a que se han realizado pocos estudios de este tipo a aleaciones y metales distintos al Ti-6Al-4V (Herderick, 2011) y aceros inoxidable.

En la Pontificia Universidad Católica de Chile los trabajos de Benavente (Benavente & Ramos, 2009), Sanz-Guerrero (Sanz-Guerrero & J, 2007), Reyes (Reyes & Walczak, 2015), Zañartu (Zañartu & Ramos, 2009), entre otros, dan a conocer los esfuerzos que se han realizado para desarrollar estas tecnologías.

### **1.2 Hipótesis**

El tipo de patrón y parámetros de escaneo del láser sobre el polvo metálico afectan tanto las propiedades físicas como mecánicas de la monocapa y a lo largo

de esta. Se espera que el espesor, la densidad másica y resistencia mecánica incrementen al utilizar patrones de escaneo cortos y velocidades de barrido bajas.

### **1.3 Objetivos principales**

El objetivo de esta investigación es determinar cómo afecta el cambio de potencia, velocidad y patrón de escaneo a las diferentes propiedades mecánicas y características de monocapas sinterizadas a partir de polvo en base a cobre con estaño y níquel. Esto con el fin de poder determinar los parámetros óptimos de procesamiento o poder predecir cierta propiedad. Para lograr esto fue necesario trabajar en 5 objetivos principales:

1. Construir una cámara en la cual sea posible controlar la atmósfera en su interior para así obtener probetas libres de oxidación.
2. Determinar los parámetros de operación del equipo de escaneo para así generar las probetas según los parámetros establecidos.
3. Determinar la potencia del láser, velocidades y patrones de escaneo dentro de los cuales es posible obtener probetas, que se les pueda realizar los análisis requeridos.
4. Generar probetas a distintas velocidades y patrones de escaneo manteniendo la potencia constante para poder predecir los resultados que se obtendrán según los parámetros que se utilicen pudiendo así poder seleccionar parámetros que optimicen la propiedad mecánica requerida.
5. Generar probetas a distintas potencias y patrones de escaneo manteniendo la velocidad constante con el mismo propósito que el punto anterior.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Proceso de sinterizado**

El proceso de sinterizado es un tratamiento térmico que une de forma coherente a partículas de un material, en el cual el fenómeno que predomina es el transporte de masa que ocurre a nivel atómico por difusión. Esta unión lleva a una mejor resistencia mecánica y a una disminución de la energía del sistema (German, 1996) y está supeditada a la reducción de área superficial.

El proceso de sinterizado consiste principalmente en 6 pasos, los cuales no necesariamente son secuenciales. Estos pasos son (Eisen et al., 1998):

- Comienzo de la unión entre partículas.
- Crecimiento de cuello.
- Las cavidades entre las partículas de polvo se desconectan entre ellas.
- Las cavidades entre las partículas de polvo toman geometrías más esféricas.
- Densificación de la pieza o disminución del tamaño de los poros.

Algunos de los factores que condicionan el resultado del sinterizado son (Eisen et al., 1998):

- Tasa a la cual se calienta y enfría el material.
- Tiempo de sinterizado.
- Atmósfera de sinterizado.
- Temperatura de sinterizado.

La unión entre partículas se puede observar en la Figura 2-1, donde se puede ver el crecimiento del cuello entre las partículas. A medida que se incrementa la temperatura y presión, la velocidad de crecimiento de este cuello aumenta. Es interesante destacar que este proceso sucede a temperatura y presión ambiente, pero a tasas muy pequeñas (Fang, 2010).

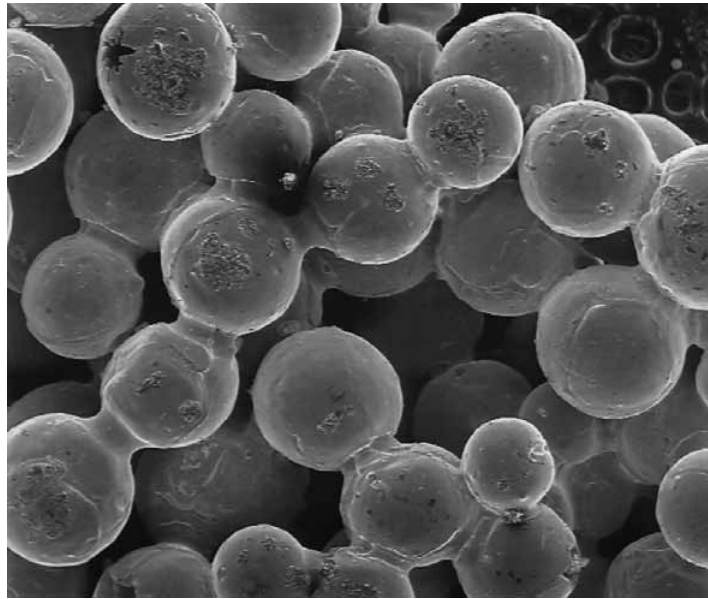


Figura 2-1: Cuello formando entre partículas de bronce con diámetro de 26  $\mu\text{m}$  sinterizadas a 800°C (Fang, 2010).

## 2.2 Interacción entre el láser y el polvo metálico

El principal mecanismo por el cual se transfiere la energía desde el láser al material es por radiación, parte de esta radiación es absorbida por el material y el resto es reflejada. La cantidad absorbida por el material define el índice de absortividad, el cual es un número que oscila entre 0 y 1, y depende principalmente del material y su morfología, y de la longitud de onda del láser.

Para el caso en el cual se utiliza un haz láser sobre polvo metálico el comportamiento se muestra esquemáticamente en la Figura 2-2, donde la radiación láser reflejada puede salir de la cama de polvo o interactuar con otra partícula del polvo por el fenómeno de dispersión (Jiang & Gutowski, 2015).

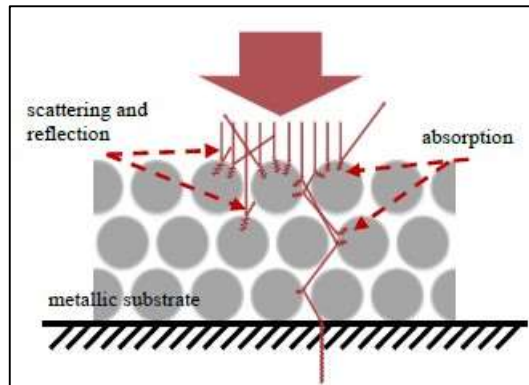


Figura 2-2: Penetración del haz láser (Jiang & Gutowski, 2015).

Luego de que la energía aportada por el láser sea absorbida por el polvo, las partículas irradiadas transfieren el calor a las partículas contiguas mediante conducción térmica y en caso de haber derretimiento de alguna partícula, habrá conducción térmica entre el líquido y el sólido. La mayor parte de la energía aportada por el haz láser es absorbida por las partículas en la parte superior de la cama de polvo, por lo cual la radiación es menos intensa en las capas inferiores de polvo; por ejemplo, para una cama de polvo de un espesor de  $150\ \mu\text{m}$ , la absorción se distribuye según la Figura 2-3 (Jiang & Gutowski, 2015).

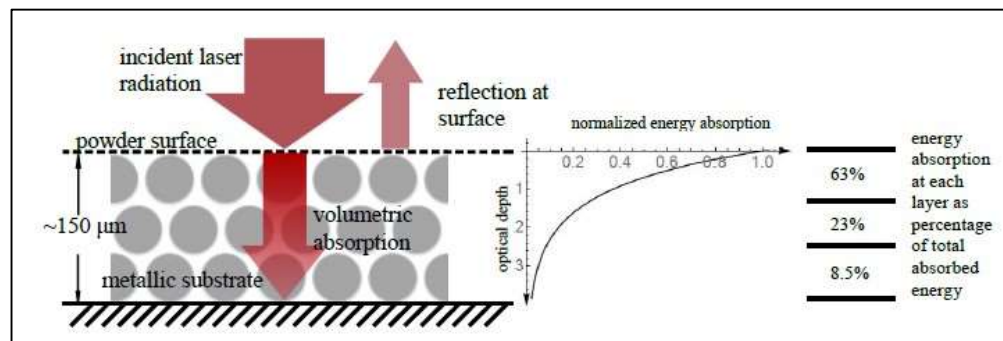


Figura 2-3: Distribución de la absorción del láser sobre una cama de polvo (Jiang & Gutowski, 2015).

### 2.3 Sinterizado selectivo por láser

El sinterizado selectivo por láser (SLS, por sus siglas en inglés) es un proceso de manufactura que consiste en sinterizar capas de polvo consecutivas utilizando como fuente de energía un haz láser continuo o pulsado (Despa & Gheorghe, 2011).

EL SLS ocurre por dos mecanismos principales, el primero se denomina sinterizado láser indirecto, en el cual al polvo metálico se le agrega un material con bajo punto de fusión siendo este el único material fundido (Tang et al., 2003), este material fundido escurre entre las partículas no fundidas casi de manera instantánea debido a las fuerzas capilares intensas que se generan. Por lo general se llama aglutinante al material con bajo punto de fusión y material estructural al con alto punto de fusión (J. P. Kruth, Levy, Klocke, & Childs, 2007). Se puede ver un esquema de este proceso en la Figura 2-4.

Existen diferentes métodos para unir los distintos elementos, como por ejemplo utilizar polvo con partículas micro-compuestas por el aglutinante y el material estructural o envolver las partículas de polvo estructural con aglutinante (J. P. Kruth et al., 2007).

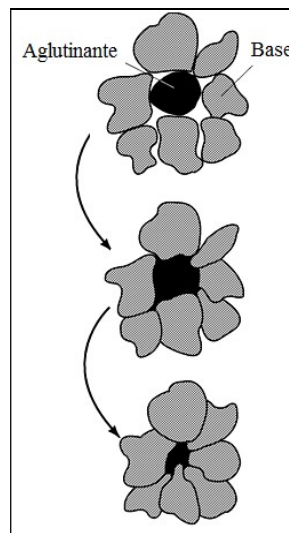


Figura 2-4: Esquema de sinterizado indirecto (Eisen et al., 1998).

El segundo mecanismo se denomina sinterizado láser directo (DMLS), el cual se diferencia al anterior en que el polvo metálico es sinterizado directamente sin la necesidad de un aditivo (Tang et al., 2003); esto sucede a temperaturas inferiores al punto de fusión del material (J. P. Kruth et al., 2007).

## 2.4 Distribución de temperaturas para una fuente de calor puntual

Carslaw y Jaeger proponen una solución para determinar la temperatura instantánea en algún punto de un material con una fuente de calor puntual (Carslaw & Jaeger, 1959), la cual para el caso de una dimensión queda según la Ecuación 2.1.

$$T(x, t) = \frac{\phi}{8 \cdot (\pi \alpha t)^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{4 \cdot \alpha t}\right) \quad (2.1)$$

Donde  $x_0$  es la posición donde se encuentra la fuente de calor,  $\phi$  es función de la carga de calor y las propiedades térmicas del material y  $\alpha$  es la difusividad térmica. Para una fuente en movimiento Darmadi propone como solución la Ecuación 2.2 (Darmadi, Norrish, & Tieu, 2011).

$$T(x, y, z, t) = \frac{\dot{q} dt}{8 \cdot \rho c_p \cdot (\pi \alpha t)^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4 \cdot \alpha t}\right) \quad (2.2)$$

Donde  $\dot{q}$  es la potencia que se le aporta al sistema,  $\rho$  la densidad másica y  $c_p$  la capacidad calorina del material.

## 2.5 Polvo DirectMetal 20

DirectMetal 20 (DM20) es un polvo metálico fino en base a bronce con níquel, el cual es comercializado por la empresa EOS GmbH. Sus principales atributos son que ofrece altas velocidades de impresión, lo que lo hace ideal para la fabricación de piezas grandes, las propiedades mecánicas son constantes en todas las direcciones y presenta una buena resistencia a la corrosión (EOS GmbH, 2004).

Sus principales aplicaciones comerciales son (EOS GmbH, 2004):

- Realizar prototipos metálicos funcionales.
- Fabricar moldes para inyección de materiales termoplásticos.

Las propiedades reportadas por EOS GmbH del polvo DM20 se encuentran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Propiedades reportadas de DM20 sinterizado (EOS GmbH, 2004).

	DM20
Densidad másica en sectores delgados/ $\text{g/cm}^3$	7.6
Densidad másica en el núcleo/ $\text{g/cm}^3$	6.3
Porosidad mínima/ %	8
Resistencia a la tracción/ MPa	400
Resistencia a la fluencia/ MPa	200
Módulo de Young/ GPa	80
Conductividad térmica/ W/mK	40

### **3. MARCO EXPERIMENTAL**

Se realizaron dos variantes experimentales, en ambos casos se sinterizaron monocapas de 6 mm de ancho y 62 mm de largo. La primera consistió en mantener constante la potencia del láser a 190 W y sinterizar probetas con distintos patrones y a 3 velocidades de escaneo distintas, como se describe en la sección 3.2.1. La segunda consistió en mantener la velocidad de escaneo constante a 80 mm/s y realizar diferentes patrones a 190 y 260 W como se describe en la sección 3.2.2. Esto con el fin de determinar cómo afectan los distintos parámetros a las propiedades mecánicas y características estructurales.

#### **3.1 Configuración experimental**

Se utilizó como fuente de calor un láser de fibra de Nd:YAG modelo YLR-300-AC-MM marca IPG Photonics corporation (IPG-Photonics, 2010) el cual tiene una potencia máxima de 300 W y una longitud de onda de 1,07  $\mu\text{m}$ . El láser se mantuvo enfocado con un diámetro de 0,24 mm para todas las experiencias realizadas.

Todas las muestras fueron producidas bajo atmósfera controlada de argón a 17 °C en una cámara especialmente diseñada (Figura 3-1). La cámara tiene conectada una bomba mecánica de vacío y una línea para ingresar argón. La línea de ingreso de argón se encontraba conectada a un cilindro de argón comprimido marca Linde (Linde, 2016). El esquema de la configuración experimental utilizada se puede ver en la Figura 3-2.



Figura 3-1: Cámara utilizada para generar las probetas.

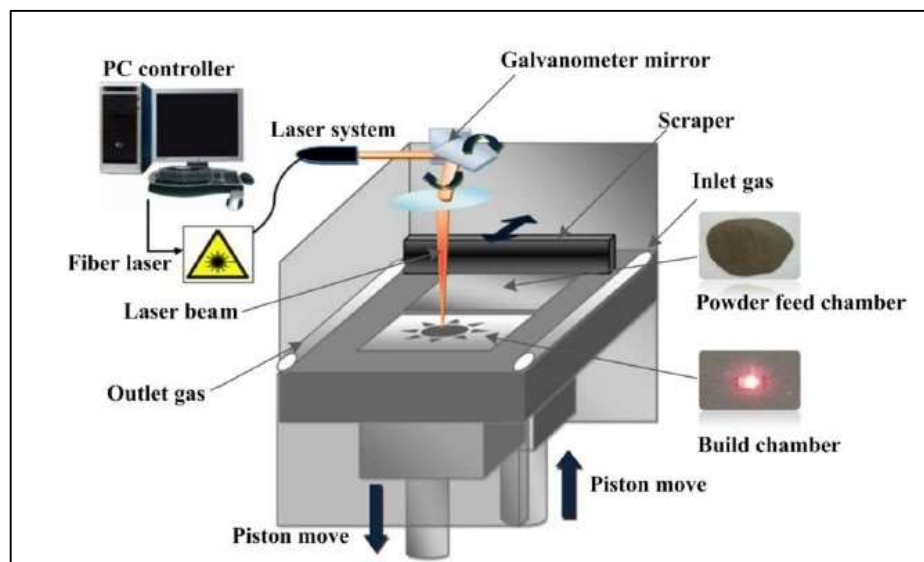


Figura 3-2: Esquema de DMLS (Laohaprapanon et al., 2012).



## **3.2 Procedimiento experimental**

### **3.2.1 Variación en las propiedades mecánicas al modificar la velocidad escaneo**

Cada probeta fue sinterizada a una velocidad y a un patrón de escaneo específico. Para cada una se realizaron los siguientes pasos:

1. Cargar con polvo DM20 un recipiente de 15 cm de largo, 4 cm de ancho y 2 cm de profundidad.
2. Deslizar una lámina sobre el polvo para dejar la superficie lisa evitando que el polvo se comprimiera.
3. Introducir el recipiente cargado dentro de la cámara.
4. Cerrar la cámara.
5. Introducir el parámetro de velocidad de escaneo descrito en la sección 3.3.2 y cargar el documento con el patrón requerido al computador.
6. Encender el equipo láser y ajustarlo a una potencia a 190 W.
7. Encender la bomba mecánica y mantener una presión de 0,2 bar al interior de la cámara por 15 minutos.
8. Detener la bomba mecánica y abrir la llave de paso de la línea de argón hasta que la presión de la cámara iguale la presión atmosférica.
9. Realizar el proceso de escaneo láser generando probetas de 6 mm de ancho y 62 mm de largo.
10. Una vez finalizado el proceso de escaneo esperar 5 minutos a que el material sinterizado se enfríe.
11. Abrir la cámara y retirar la probeta finalizada.

Los parámetros utilizados se encuentran en la

Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Parámetros utilizados.

Parámetros	Valores
Velocidades de escaneo/ mm/s	25, 50, 80
Patrones de escaneo/ °	0, 30, 45, 60 y 90
Potencia/ W	190
Paso/ mm	0,15
Temperatura ambiente/ °C	17
Presión de vacío/ bar	0,2
Tiempo de vacío/ minutos	15
Dimensión de probetas/ mm x mm	62 x 6
Diámetro del foco del láser/ mm	0,24

Para cada combinación de parámetros se sinterizaron 3 probetas, por lo que se sinterizó un total de 45 probetas. En la Figura 3-3 se ejemplifica como son los patrones de escaneo para 0°, 45° y 90° y en la Figura 3-4 se muestra como el láser recorre una superficie específica.

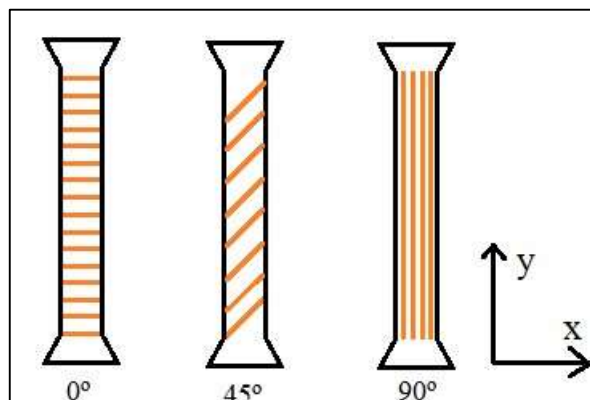


Figura 3-3: Ejemplo de patrones de escaneo.

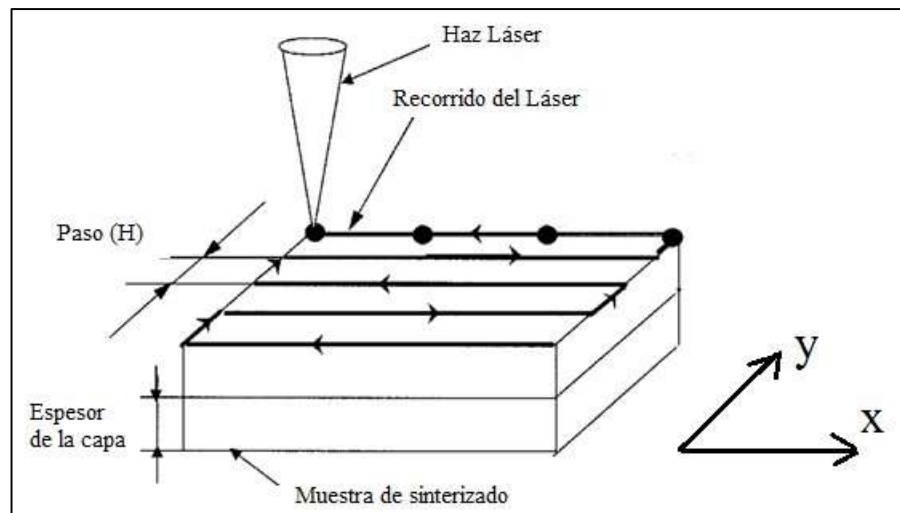


Figura 3-4: Procedimiento de escaneo (Despa &amp; Gheorghe, 2011).

A cada probeta se le registró las dimensiones, el peso y se calculó la densidad másica; luego se determinó la UTS por medio de un ensayo de tracción uniaxial. Para cada combinación de parámetros se seleccionó la con mayor UTS para ser estudiada en más detalle (se hará referencia a este grupo de probetas como “Probetas seleccionadas”). Adicionalmente a las probetas se les realizó un análisis metalográfico como se describe en la sección 3.3.4 y se determinó la tasa de derretimiento del polvo DM20 como se indica en la sección 3.4.5.

### 3.2.2 Variación en las propiedades mecánicas al modificar la potencia del láser

Se realizó el mismo procedimiento descrito en la sección 3.2.1, con la diferencia que se utilizó una potencia de láser igual a 260 W y solo a 80 mm/s de velocidad de escaneo, los parámetros utilizados se muestran en la

Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Parámetros utilizados.

Parámetros	Valores
Velocidades de escaneo/ mm/s	80
Patrones de escaneo/ °	0, 30, 45, 60 y 90
Potencia/ W	190 y 260
Paso/ mm	0.15
Temperatura ambiente/ °C	17
Presión de vacío/ bar	0,2
Tiempo de vacío/ minutos	15
Dimensión de probetas/ mm x mm	62 x 6
Diámetro del foco del láser/ mm	0,24

### 3.3 Procedimientos previos a la obtención de resultados y experimentación

#### 3.3.1 Caracterización del polvo metálico

Dado que no se reportan las concentraciones de los elementos presentes en el polvo metálico DM20. Fue necesario, para determinar las concentraciones, utilizar un microscopio electrónico de barrido modelo LEO 1420VP equipado con un analizador de dispersión de energía de rayos X (EDS por sus siglas en inglés) de Oxford Instruments, con el cual se realizó un análisis químico semi-cuantitativo a solo una muestra de polvo aleatoria, que se muestra en la Figura 3-5 en la sección delimitada por el rectángulo morado. Los resultados de este análisis se ven en la Figura 3-6 y las concentraciones de cada elemento se exponen en la Tabla 3-3.

Las propiedades de los elementos metálicos que componen el polvo DM20 se encuentran en la Tabla 3-4.

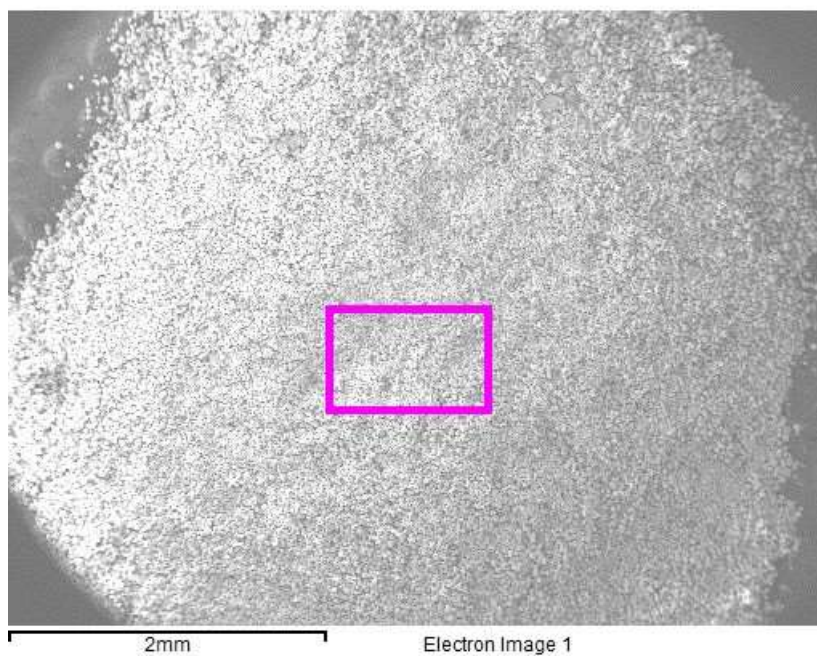


Figura 3-5: Sector de polvo analizado.

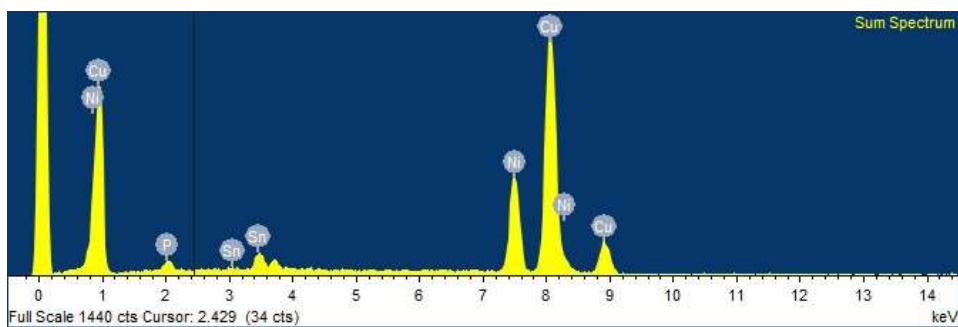


Figura 3-6: Espectro EDS del análisis químico semi-cuantitativo de DM20.

Tabla 3-3: Concentración de cada elemento en DM20 sin considerar el porcentaje de carbono y oxígeno.

	Cobre	Níquel	Estaño	Fósforo
Porcentaje másico	71,03%	22,82%	4,72%	1,43%

Tabla 3-4: Propiedades de los elementos metálicos que componen al DM20.

	Cobre	Níquel	Estaño	Referencia
Densidad másica/ $\text{kg}/\text{m}^3$	8930	8900	7300	(Ion, 2005)
$C_p/\text{J}/(\text{kg K})$	471	560	264	(Ion, 2005)
$T_f/\text{K}$	1356	1726	505	(Ion, 2005)
$\gamma_{lat}/\text{kJ}/\text{kg}$	205	302	60	(Ion, 2005)
Asertividad	0,59	0,64	0,66	(Santos, Shiomi, Osakada, & Laoui, 2006)

### 3.3.2 Parámetros de operación del equipo

Dado que el equipo opera bajo parámetros propios para ajustar la velocidad de escaneo del haz láser, fue necesario asociar este parámetro a una velocidad real.

Para esto se varió el parámetro entre 400 y 1000 y se registró el avance del láser sobre un papel milimetrado en un video, permitiendo determinar el tiempo que toma en recorrer una cierta distancia. Para cada configuración se midió la velocidad en línea recta (a) y realizando un patrón como el que se muestra en la Figura 3-3 de 0° (b).

Los resultados se muestran en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Velocidades según parámetro del equipo.

Parámetro	(a)mm/s	(b)mm/s
270	78,2	84,9
340	63,1	65,7
500	42,5	44,4
650	32,5	35,8
800	27,2	30,0
1000	21,2	23,9

Estos resultados fueron graficados utilizando el *software* Excel de Microsoft office y luego se ajustó una curva de potencia como se muestra en la Figura 3-7.

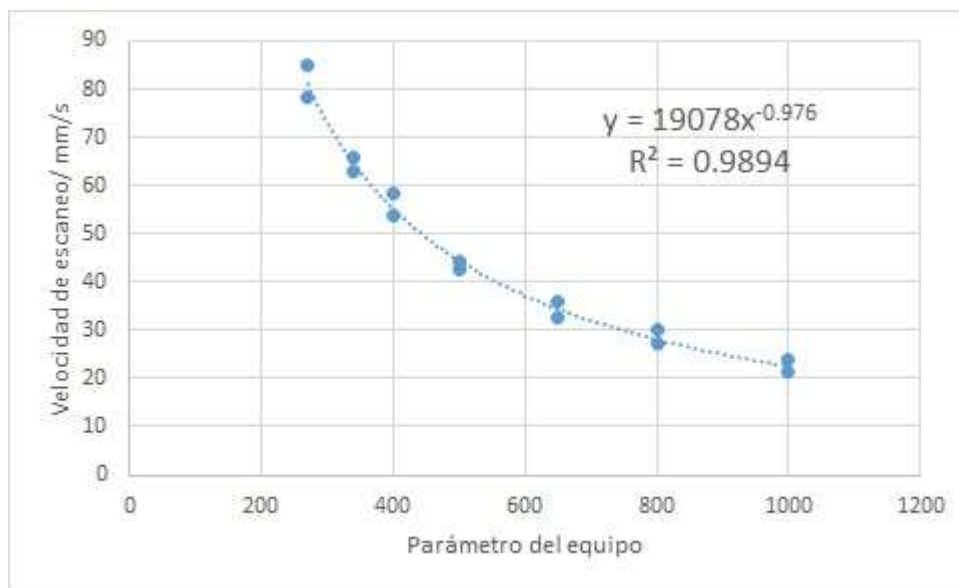


Figura 3-7: Relación entre parámetro del equipo y velocidad real.

Obteniendo una relación entre la velocidad real y el parámetro del equipo como se muestra en la Ecuación 3.1 con un  $R^2$  aproximado de 0,99.

$$\vec{V}_r = 19078(X_{par})^{-0,976} \quad (3.1)$$

Donde  $\vec{V}_r$  es la velocidad real en mm/s y  $X_{par}$  es el parámetro del equipo.

### 3.3.3 Medición diámetro del láser

El diámetro del haz láser focalizado se determinó midiendo líneas en el polvo sinterizado por medio del *software* ImageJ como se muestra en la Figura 3-8.

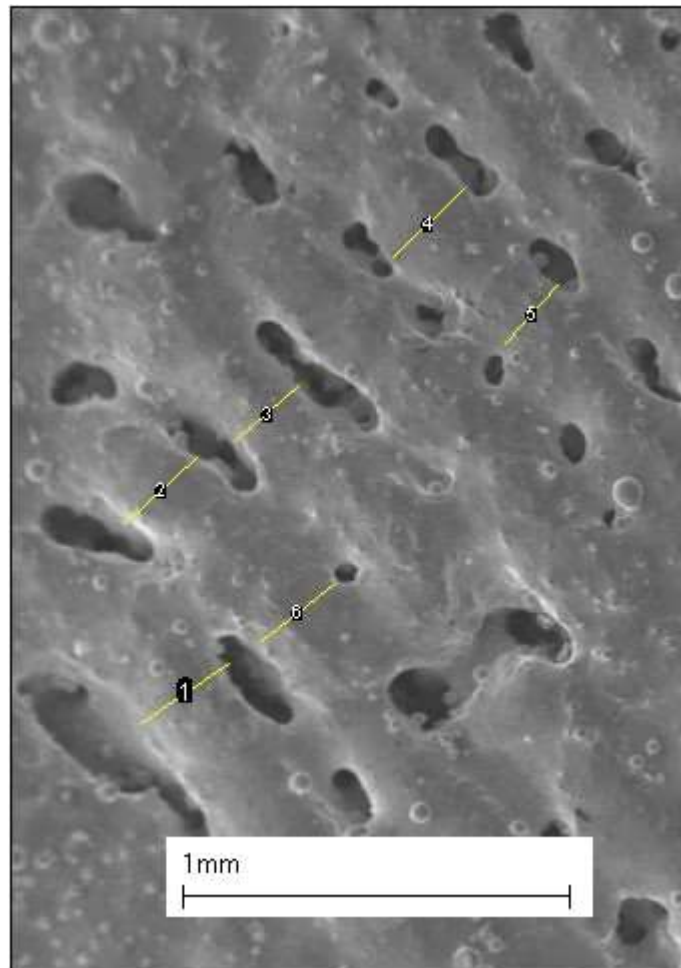


Figura 3-8: Imagen superior de probeta.

Las mediciones se muestran en la Tabla 3-6, donde se muestra que el diámetro promedio del haz láser es de 0,24 mm.



Tabla 3-6: Mediciones diámetro del láser.

	Largo/ mm
1	0,275
2	0,252
3	0,219
4	0,252
5	0,201
6	0,242
Promedio	0,24

### 3.3.4 Preparación de muestras para análisis metalográfico y obtención de imágenes

Las probetas seleccionadas fueron cortadas con una sierra de baja velocidad marca Buehler IsoMet para evitar que la temperatura del corte distorsionara las medidas. Luego, los segmentos de las probetas fueron montadas en resina caliente y posteriormente pulidas mecánicamente. Finalmente, utilizando un microscopio Nikon OPTIHOT-100, se registraron las imágenes suficientes para cubrir todo el segmento de un corte transversal con un aumento de x200 utilizando el *software* Moticam 2300. Las imágenes fueron ensambladas utilizando el *software* ImageJ, de código abierto.

Las imágenes obtenidas y ya ensambladas se pueden ver en el Anexo A.

### 3.3.5 Estimación de la densidad energética

La densidad energética se determinó según la Ecuación 3.2, donde  $E_{dens}$  es la densidad energética,  $Pot$  es la potencia suministrada por el láser,  $\vec{V}_L$  es la velocidad del láser y  $D_{láser}$  es el diámetro de focalización del láser.

$$E_{dens} = \frac{Pot}{\vec{V}_L D_{laser}} \quad (3.2)$$

### 3.3.1 Distribución de temperaturas para una fuente de calor puntual

Para el caso de un láser recorriendo una superficie de la forma que se muestra en la

Figura 3-9 y con el fin de mostrar cómo influye el patrón de escaneo en la temperatura del proceso de sinterizado se consideró el siguiente caso:

El láser entrega energía al punto (B), la cual depende del diámetro focal, velocidad del láser ( $V_L$ ) y la potencia del láser (Pot). Luego se determina la temperatura en el punto (A), considerando el tiempo que toma el haz láser en recorrer la distancia necesaria para llegar del punto (B) al (A); este tiempo depende del ancho de la probeta ( $L_p$ ), el paso (H), la velocidad del láser y el ángulo del patrón de escaneo ( $\theta$ ).

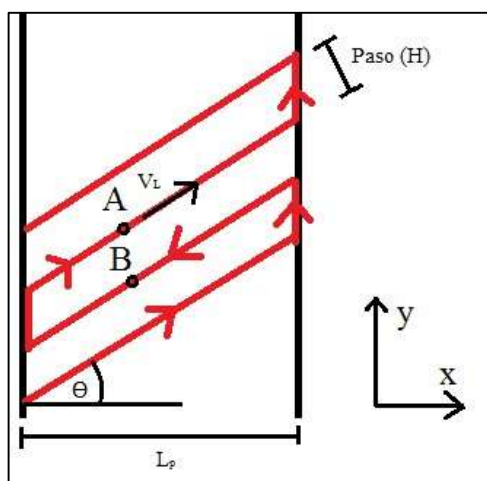


Figura 3-9: Ejemplo del patrón de escaneo.

Dado que el diámetro focal del haz láser es de 0,24 mm, se puede considerar como una fuente puntual de calor, por lo cual, se puede utilizar la Ecuación de Darmadi descrita en la sección 2.4.

La solución para este caso sería dada por la Ecuación 3.3.

$$T(\theta) = \frac{Pot \cdot \frac{D_{laser}}{V_L}}{8 \cdot \rho c_p} \cdot \left( \frac{V_L \cdot \cos(\theta)}{\pi \alpha L_p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left( -\frac{H^2 V_L}{4 \cdot \alpha \cdot \cos(\theta) L_p} \right) \quad (3.3)$$

A  $90^\circ$  la distancia  $L_p$  es infinita, lo cual no tiene sentido físico para esta investigación, debido a esto, se definió que para este caso la distancia  $L_p$  se considerara 6 veces mayor y se denominara  $L_t$  (se definió de esta forma dado que es una situación razonable en el caso que se esté realizando un proceso de SLS o DMLS). Para este caso la solución queda dada por la Ecuación 3.4.

$$T = \frac{Pot \cdot \frac{D_{laser}}{V_L}}{8 \cdot \rho c_p} \cdot \left( \frac{V_L}{\pi \alpha L_t} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left( -\frac{H^2 V_L}{4 \cdot \alpha L_t} \right) \quad (3.4)$$

La forma de la solución para el caso descrito previamente tomando valores referenciales para dos potencias distintas se muestra en la Figura 3-10. La potencia utilizada para el caso (b) es el doble que la utilizada para (a).

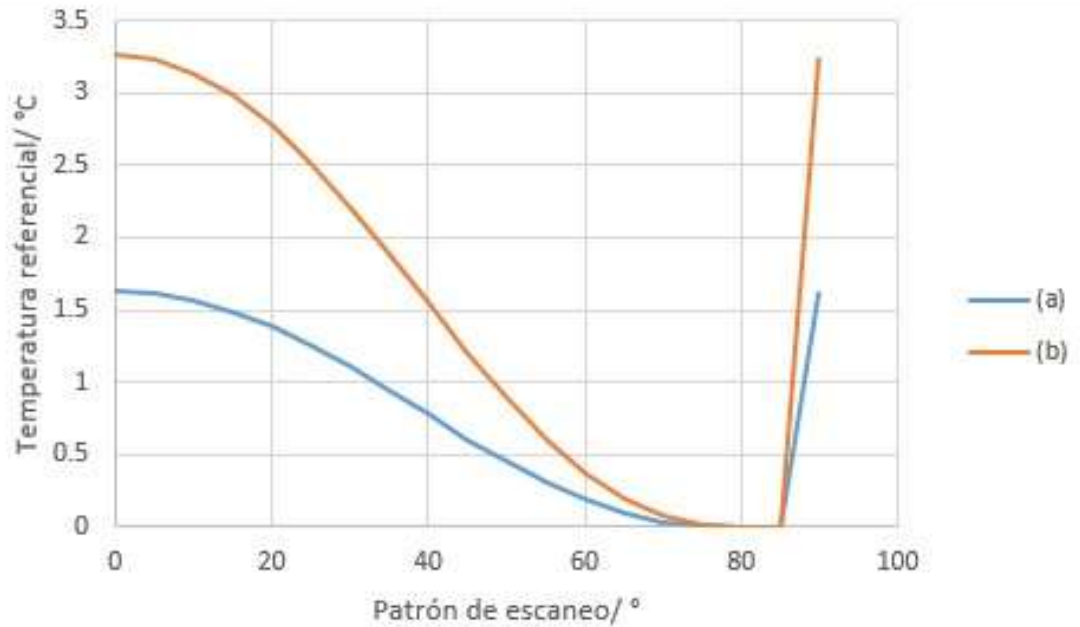


Figura 3-10: Comportamiento de la temperatura para el caso descrito, siendo la curva (b) generada utilizando la mitad de la potencia que para la curva (a).

### 3.4 Procedimientos para la obtención de resultados

#### 3.4.1 Medición de espesor

Utilizando el *software* ImageJ, el cual cuenta con una herramienta que permite asociar un cierto número de píxeles con la escala establecida por *software* Moticam 2300 sobre la imagen, se midió el espesor de las probetas seleccionadas.

#### 3.4.2 Medición de densidad másica real

La densidad másica de las probetas se obtuvo utilizando el método de Arquímedes (Karg, Ahuja, Kuryntsev, Gorunov, & Schmidt, 2014), pesando las probetas con una balanza analítica en la atmósfera y sumergidas en agua y utilizando la Ecuación 3.5, donde  $\rho_{Experimental}$  es la densidad másica de la probeta,  $\rho_{H_2O}$  la densidad másica del agua,  $P_{atm}$  es el peso de la probeta y  $P_{H_2O}$  el peso de esta sumergida en agua.

$$\rho_{Experimental} = \frac{P_{atm}\rho_{H_2O}}{P_{atm} - P_{H_2O}} \quad (3.5)$$

#### 3.4.3 Medición de densidad másica relativa

La densidad másica relativa se determina según la Ecuación 3.6, donde  $\rho_{teo}$  es la densidad másica teórica del DM20.

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{Experimental}}{\rho_{teo}} \quad (3.6)$$

Para determinar la densidad másica teórica se debe considerar las densidades de los elementos que componen el DM20 mostradas en la Tabla 3.4 y las concentraciones de los elementos expuestos en la Tabla 3.3, en conjunto con la Ecuación 3.7.

$$\rho_{teo} = \chi_{Cu} \rho_{Cu} + \chi_{Ni} \rho_{Ni} + \chi_{Sn} \rho_{Sn} + \chi_P \rho_P \quad (3.7)$$

Donde  $\chi_i$  corresponde al porcentaje másico del elemento  $i$  y  $\rho_i$  su densidad másica.

Dado que la concentración de fósforo es pequeña y que su peso atómico es bajo respecto a los demás elementos presentes, el fósforo no se consideró para calcular la densidad másica teórica, debido a esto, se utilizó la Ecuación 3.8 en vez de la Ecuación 3.7. De esta forma se determinó que la densidad másica teórica es  $8.845 \text{ kg/m}^3$ .

$$\rho_{\text{teo}} = \chi_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}} + \chi_{\text{Ni}} \rho_{\text{Ni}} + \chi_{\text{Sn}} \rho_{\text{Sn}} \quad (3.8)$$

#### 3.4.4 Resistencia ultima a la tracción

A cada probeta se le realizó un ensayo de tracción con una máquina para ensayo de tracción marca Instron, la cual estaba equipada con una celda de carga de 4.900 N y configurada a un avance de 1 milímetro por minuto. La carga máxima registrada se dividió por el área transversal inicial de la probeta para así determinar la UTS.

#### 3.4.5 Determinación de la tasa de derretimiento del polvo

La tasa de derretimiento del polvo se determinó utilizando el peso y largo de una sección de cada probeta en conjunto con la velocidad de avance del láser (Figura 3-11).

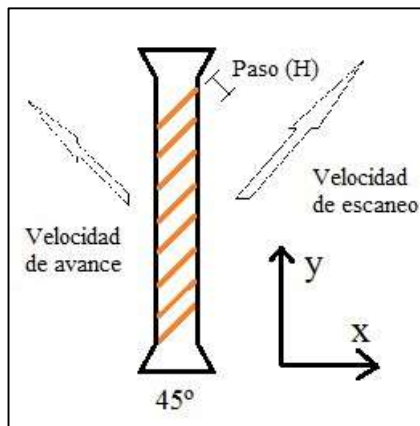


Figura 3-11: Descripción de las velocidades.

La velocidad de avance se determinó utilizando la Ecuación 3.9, la cual depende del patrón y velocidad de escaneo. Se utilizó la Ecuación 3.9 para todos los casos, menos en aquellos que el patrón fuese igual a  $90^\circ$ .

$$\vec{V}_{a,i} = \frac{H \cos(\theta_i) \vec{V}_{L,i}}{L_p} \quad (3.9)$$

En la Ecuación 3.9  $H$  es el paso,  $\theta_i$  es el ángulo del patrón de escaneo,  $V_{L,i}$  es la velocidad de escaneo del láser y  $L_p$  es el ancho de la probeta  $i$ , que como se menciona en la Tabla 3-1 es de 6 mm. Las velocidades de avance se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Velocidad de avance según los parámetros utilizados.

$\vec{V}_{a,i}$ / mm/s	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
25 mm/s	38,47	33,32	27,20	19,24
50 mm/s	76,94	66,63	54,41	38,47
80 mm/s	123,11	106,61	87,05	61,55

Utilizando los datos de la Tabla 3-7, el peso y largo del segmento, se determinó la tasa de material fundido según la Ecuación 3.10.

$$\dot{m}_{fundido} = \frac{m_i \vec{V}_{a,i}}{L_i} \quad (3.10)$$

Y para el caso en el cual el patrón es de  $90^\circ$  se utilizó la Ecuación 3.11.

$$\dot{m}_{fundido} = \frac{m_i \vec{V}_{L,i} H}{L_i L_p} \quad (3.11)$$

Donde  $m_i$  es el peso del segmento de la probeta  $i$  y  $L_i$  su largo.

### 3.4.6 Porosidad

La porosidad se determinó utilizando las imágenes obtenidas en la sección 3.3.4 del corte transversal de las probetas. Utilizando el *software* ImageJ se procesaron las imágenes para resaltar los poros como se muestra en la Figura 3-12.

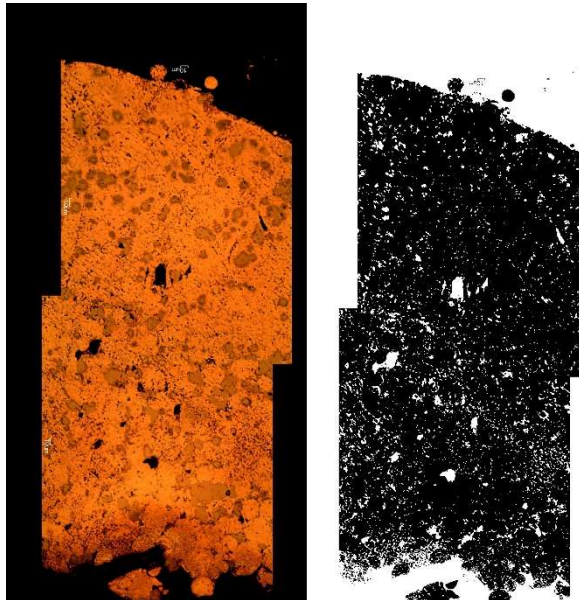


Figura 3-12: Ejemplo de imagen procesada.

Los segmentos mostrados en las imágenes se separaron en dos sectores de igual tamaño, el superior, que es el sector más cercano a donde impacta el láser y el inferior que es el sector contrario. La porosidad se midió en ambos sectores, utilizando la Ecuación 3.12, en la cual  $X_b$  es el número de pixeles blancos y  $X_t$  el número total de pixeles analizados.

$$Porosidad = \frac{X_b}{X_t} \quad (3.12)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Probetas obtenidas

Las probetas sinterizadas y analizadas se muestran en las Tablas 4-1 y 4-2.

Tabla 4-1: Probetas sinterizadas a 25 y 50 mm/s y 190 W.





















	$\vec{V}_L = 25 \text{ mm/s}$ , Pot = 190 W	$\vec{V}_L = 50 \text{ mm/s}$ , Pot = 190 W
0°		
30°		
45°		
60°		
90°		



Tabla 4-2: Probetas sinterizadas a 80 mm/s a 190 W y 260 W.

	$\vec{V}_L = 80 \text{ mm/s}, P = 190 \text{ W}$	$\vec{V}_L = 80 \text{ mm/s}, P = 260 \text{ W}$
0°		
30°		
45°		
60°		
90°		

Las imágenes obtenidas del corte transversal de las probetas se pueden ver en el Anexo C; en la Figura 4-1 se muestran las imágenes obtenidas para las probetas sinterizadas a una velocidad de escaneo de 25 mm/s y una potencia de 190 W.

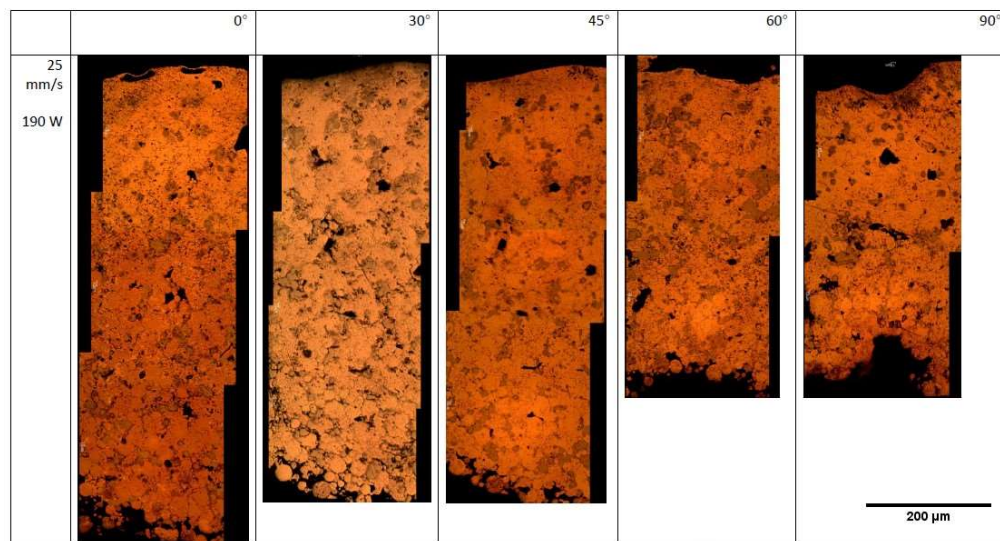


Figura 4-1: Imágenes del corte transversal.

## 4.2 Resultados al variar la velocidad escaneo

### 4.2.1 Espesor

Como es posible apreciar en la Figura 4-2, a menor velocidad y ángulo del patrón de escaneo se obtienen espesores mayores.

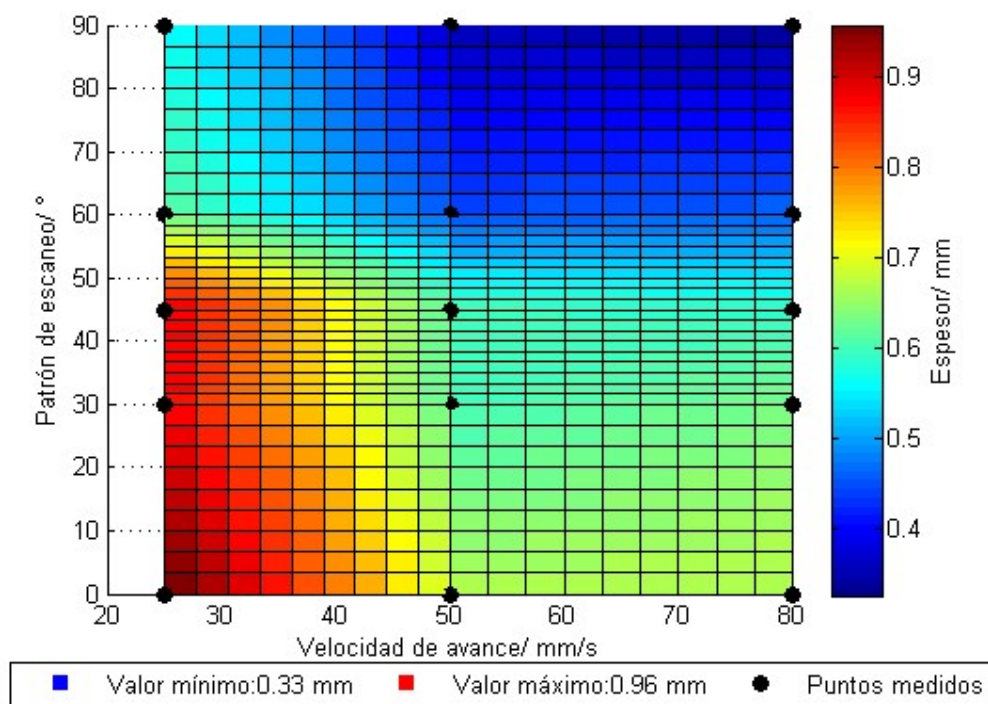


Figura 4-2: Espesor de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.

En la Figura 4-3 se puede ver que el espesor incrementa junto con la densidad energética suministrada.

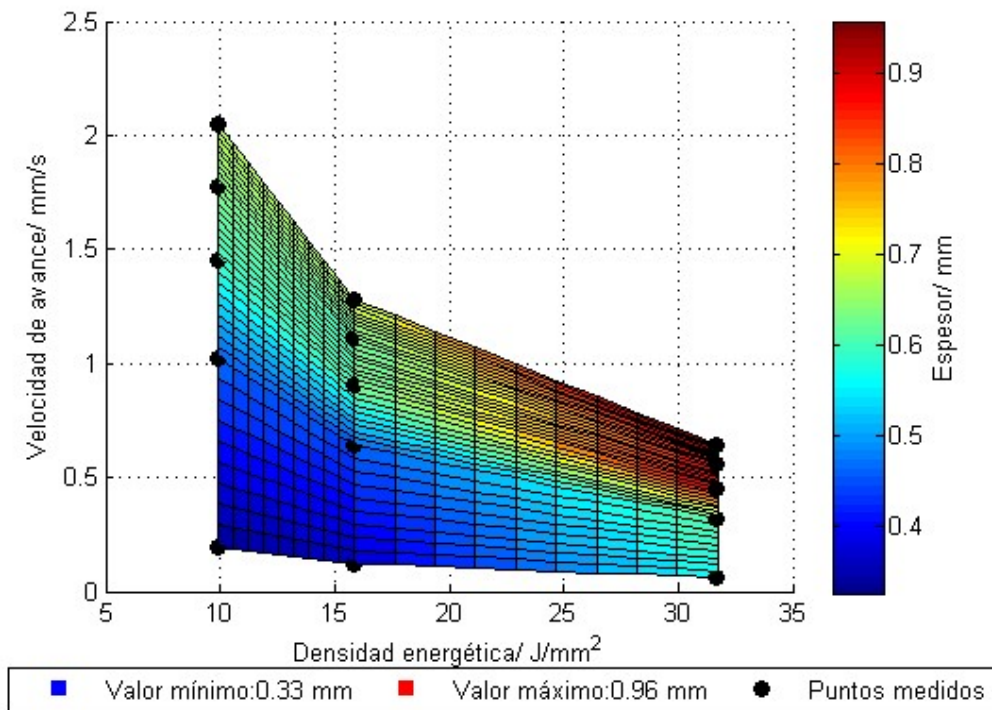


Figura 4-3: Espesor de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W.

Por ultimo en la Figura 4-4 se muestra cómo afecta la velocidad del láser al espesor de la probeta generada. Es posible notar que la variación del espesor es pequeña a velocidades de escaneo de 50 y 80 mm/s, si éstas se comparan con los resultados obtenidos a 25 mm/s.

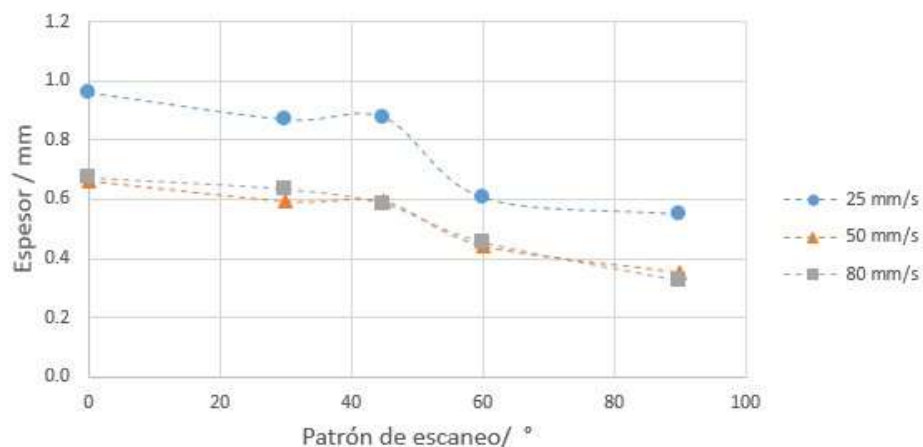


Figura 4-4: Comparación de espesores de las probetas según la velocidad de escaneo sinterizadas a 190 W.

#### 4.2.1 Densidad másica

Las densidades obtenidas según la velocidad y patrón de escaneo utilizadas se pueden ver en la Figura 4-5. Se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de escaneo, aumenta la densidad másica de las probetas.

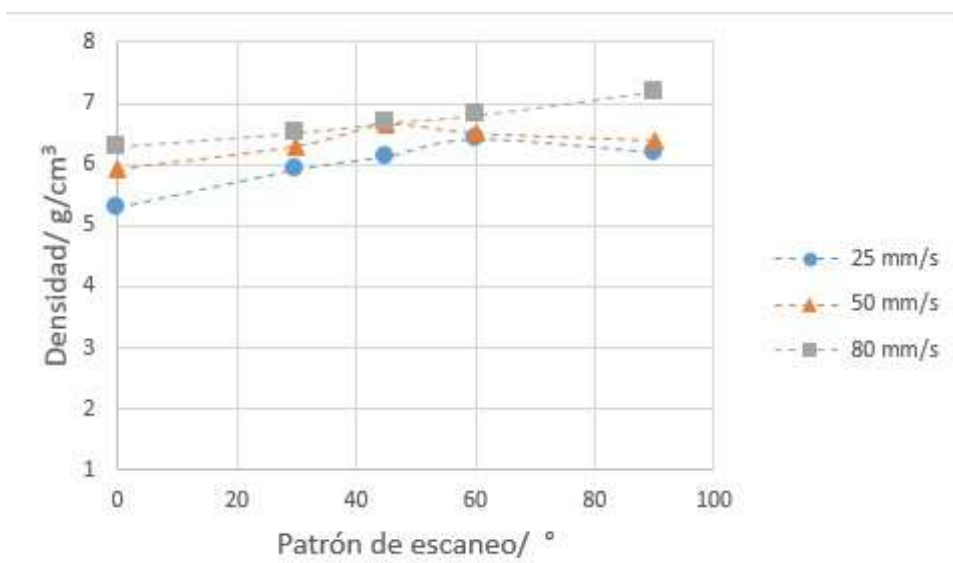


Figura 4-5: Densidad másica de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.

#### 4.2.1 Densidad másica relativa

Similar al caso de la densidad másica, en la Figura 4-6 y 4-8 es posible notar que a medida que se incrementa la velocidad y patrón de escaneo la densidad másica relativa aumenta.

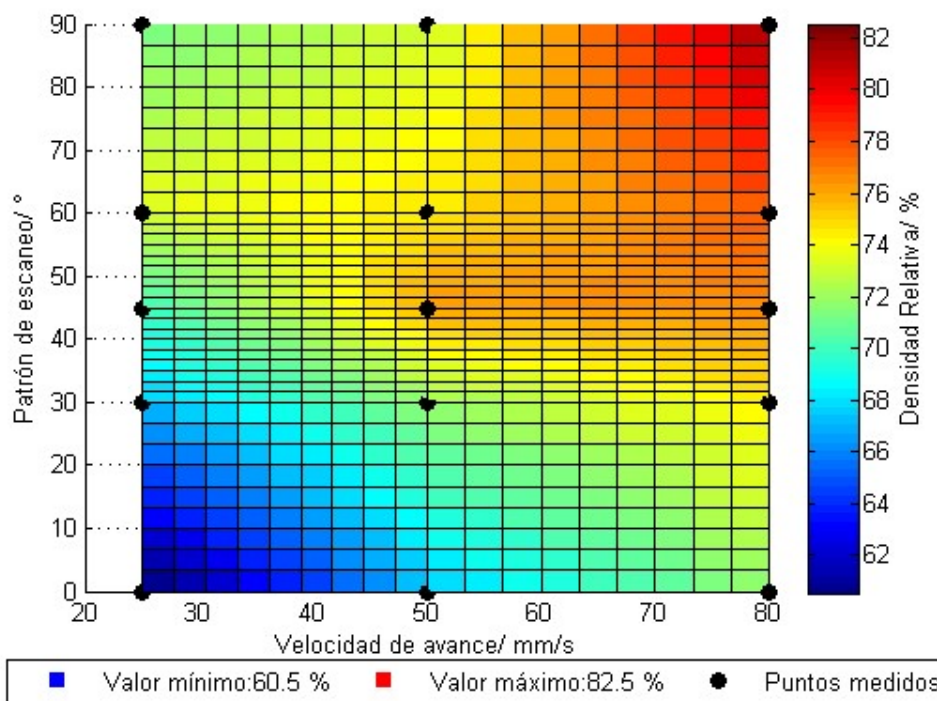


Figura 4-6: Densidad másica relativa de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.

Es interesante observar en la Figura 4-7 que la densidad másica relativa aumenta a medida que disminuye la densidad energética.



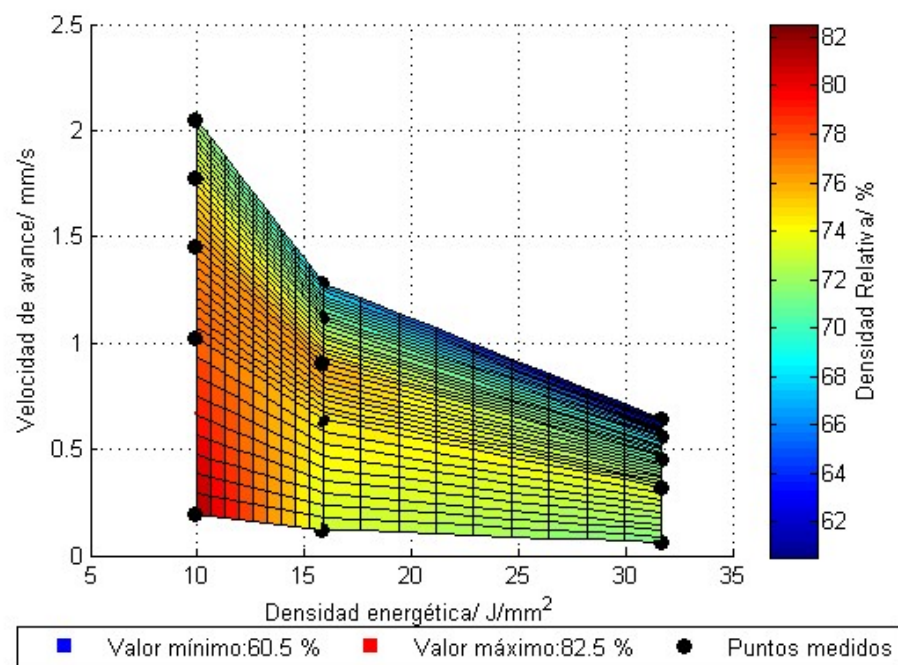


Figura 4-7: Densidad másica relativa de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W.

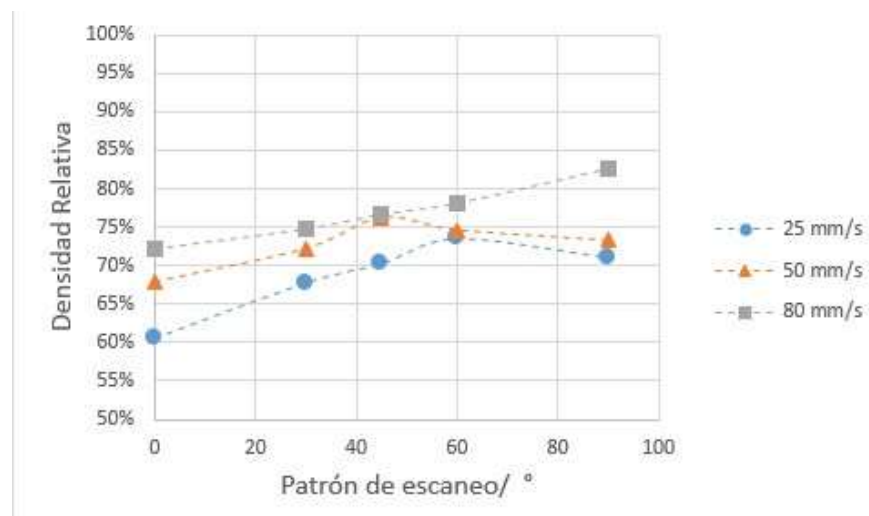


Figura 4-8: Densidad másica relativa de las probetas para distintas velocidades de escaneo sinterizadas a 190 W.

#### 4.2.1 Resistencia última a la tracción

En las Figuras 4-9 y 4-11 es posible notar que a una velocidad de escaneo de 25 mm/s, el UTS es alrededor de 20 MPa menor que para las velocidades de 50 y 80 mm/s. En estas mismas imágenes se puede ver que para un patrón de escaneo de 60° se produce un máximo de UTS independiente de la velocidad de escaneo, la cual toma un valor máximo de 100,87 MPa a una velocidad de escaneo igual a 50 mm/s.

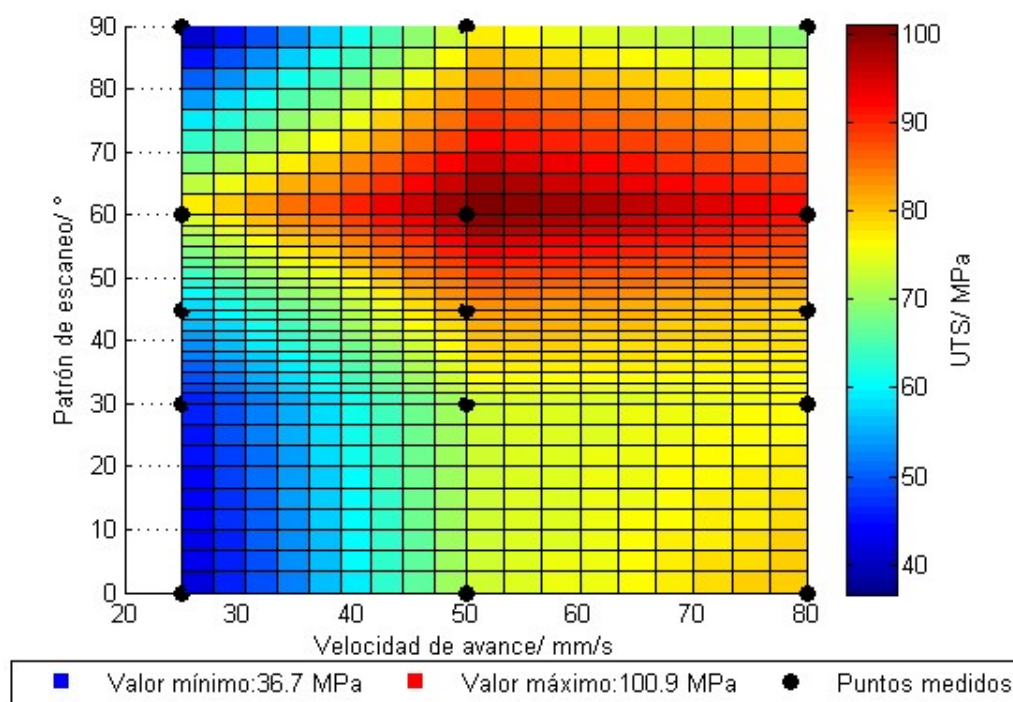


Figura 4-9: UTS de las probetas según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.



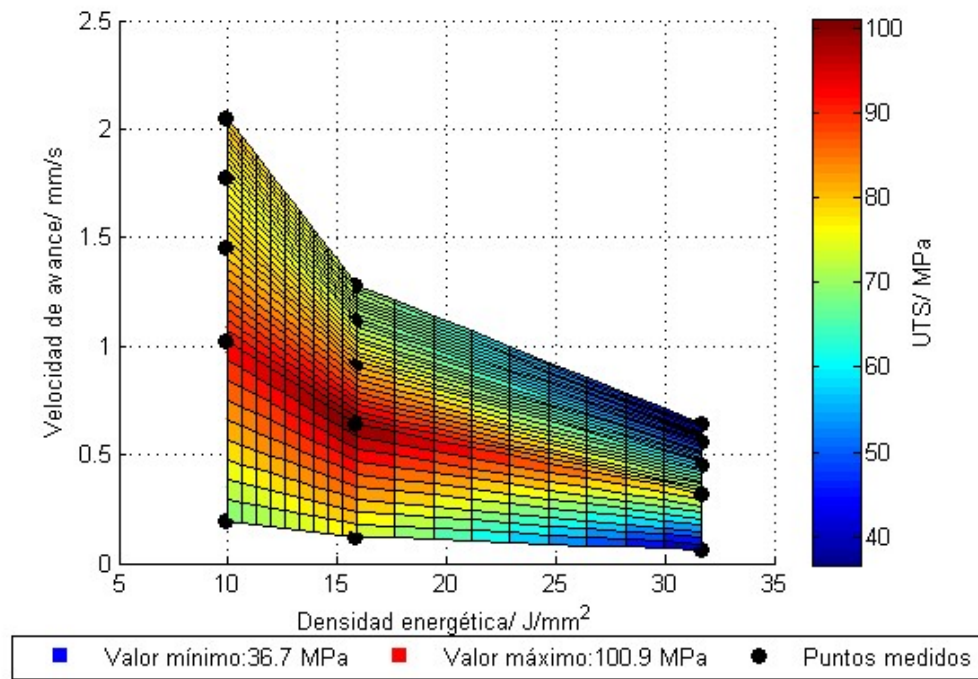


Figura 4-10: UTS de las probetas según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W.

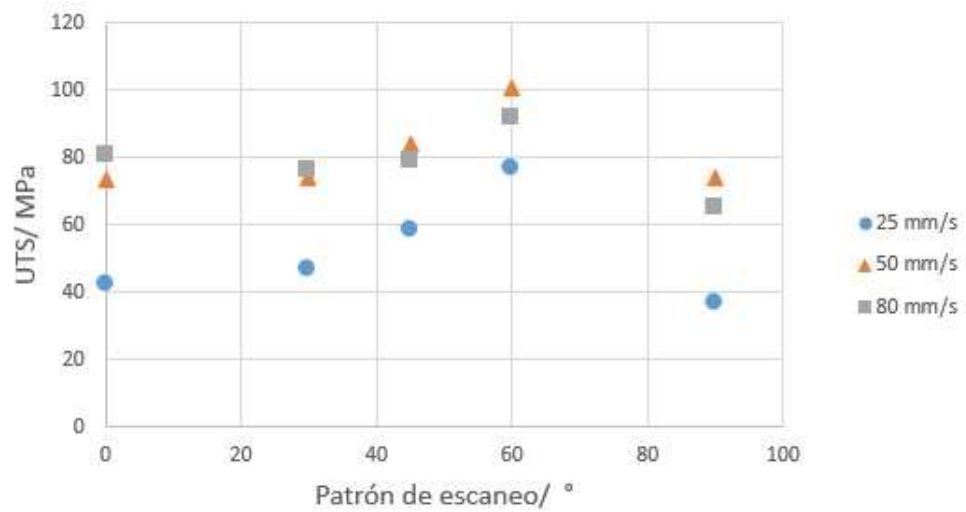


Figura 4-11: UTS de las probetas para distintas velocidades de escaneo sinterizadas a 190 W.

Con el fin de mostrar el comportamiento durante el ensayo de tracción, en la Figura 4-12 se muestran algunos gráficos de tensión-deformación obtenidos. Es interesante notar, que luego de que la probeta alcance la resistencia máxima, el material se fractura y continúa resistiendo la carga.

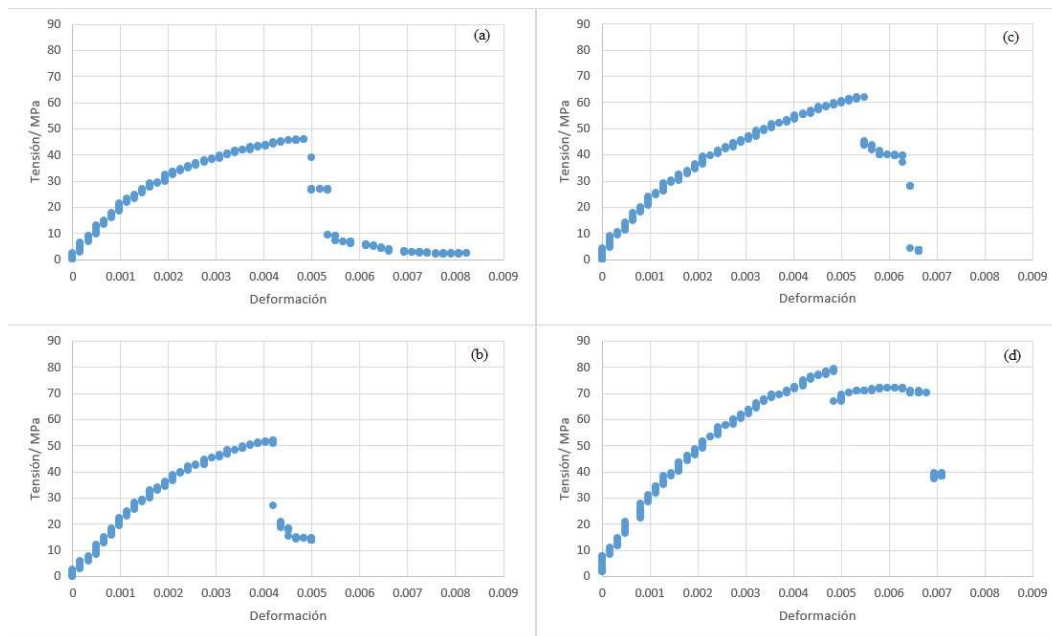


Figura 4-12: Grafico tensión-deformación obtenido a una potencia de 190 W y una velocidad de escaneo de 25 mm/s, para (a) se utilizó un patrón de escaneo de 0°, para (b) de 30°, para (c) de 45° y para (d) de 60°.

#### 4.2.1 Tasa de derretimiento del polvo

La tasa de derretimiento del polvo tiene una relación directa con la velocidad de escaneo, esto es posible verlo en la Figura 4-15, donde se aprecia que la UTS incrementa a medida que se aumenta la velocidad de escaneo. En esta misma Figura y en la Figura 4-13 es posible notar que a un patrón de 60° de escaneo, independiente de la velocidad, existe un punto mínimo en la tasa de derretimiento de polvo, el cual toma un valor mínimo de 0,62 g/min a una velocidad de escaneo igual a 25 mm/s.

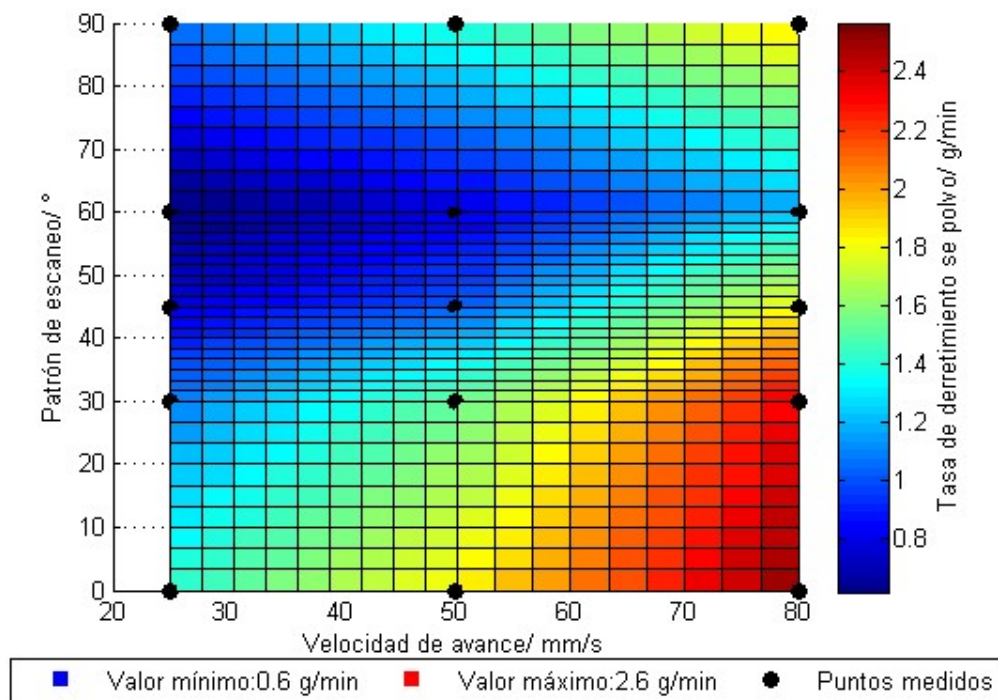


Figura 4-13: Tasa de derretimiento del material según la velocidad y patrón de escaneo sinterizadas a 190 W.

Es interesante observar en la Figura 4-14 que la tasa de derretimiento de polvo es máxima para la configuración en la cual la densidad energética es mínima y la velocidad de avance máxima. En este caso la tasa de derretimiento toma un valor de 2,57 g/min.

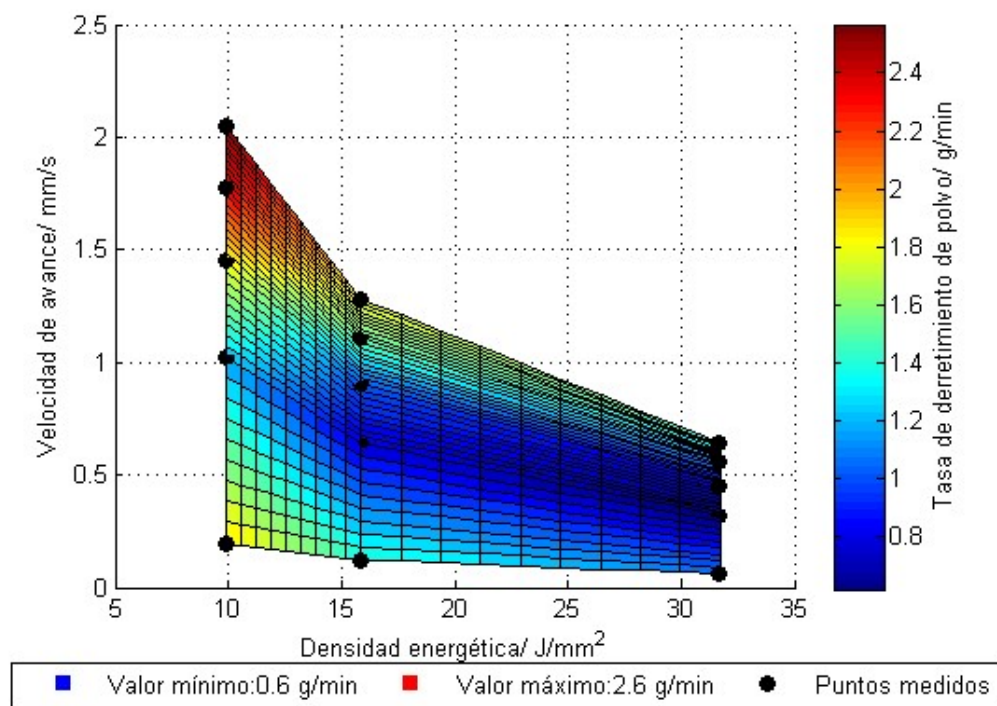


Figura 4-14: Tasa de derretimiento del material según la densidad energética y velocidad de avance sinterizadas a 190 W.

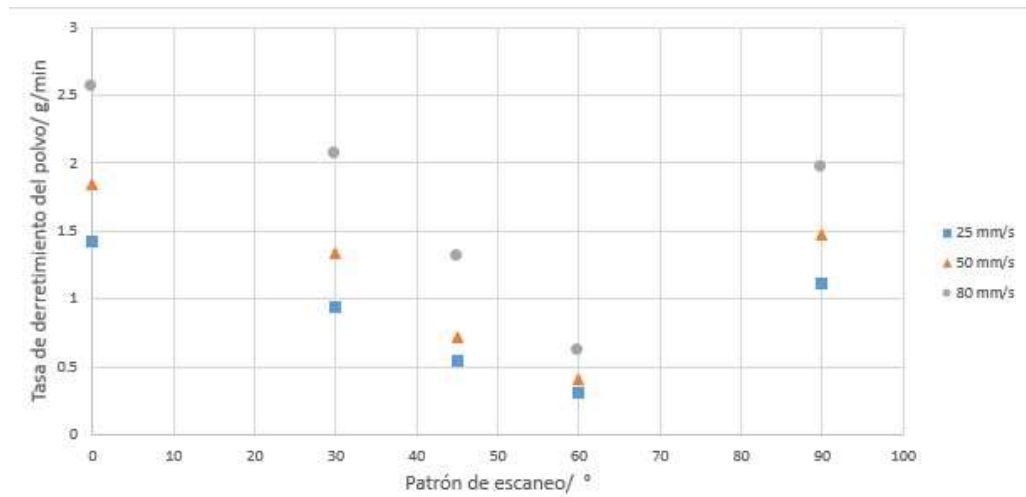


Figura 4-15: Tasa de derretimiento del polvo según la velocidad de escaneo sinterizadas a 190 W.

#### 4.2.1 Porosidad

En la Figura 4-16 se muestra la porosidad en el segmento superior de las probetas, en la cual se puede notar que la porosidad es máxima para un patrón de escaneo de  $90^\circ$ , y que esta disminuye para patrones que se encuentran entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Al comparar la Figura 4-16 con la Figura 4-17 se puede observar que existe una diferencia tanto en la distribución como la densidad de poros entre el segmento superior e inferior. En las Figuras 4-18, 4-19 y 4-20 se muestra la diferencia de porosidad existente entre el segmento superior e inferior para distintas velocidades y patrones de escaneo. Es posible identificar que para todos los casos la porosidad es mayor en el segmento inferior y menor en el superior.

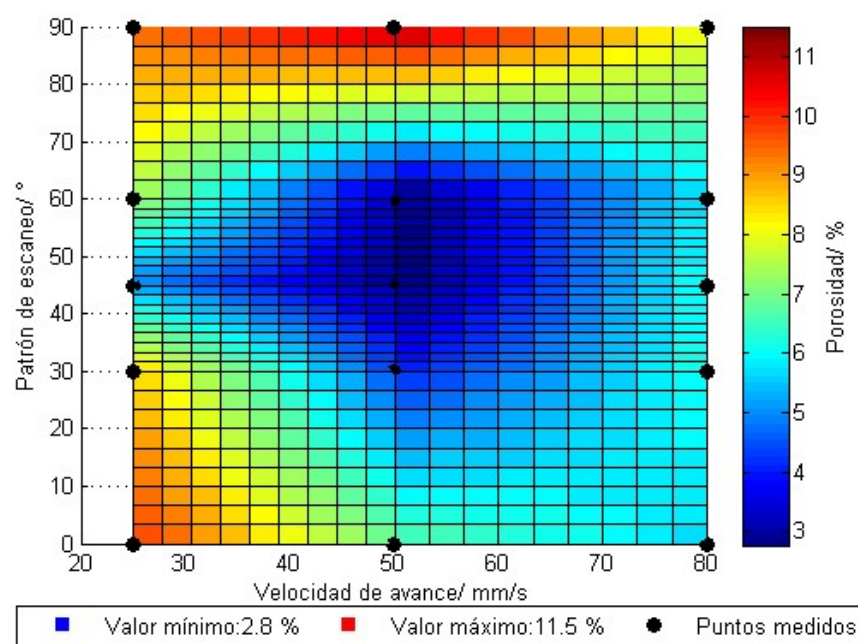


Figura 4-16: Porosidad en el segmento superior de probetas sinterizadas a 190 W.

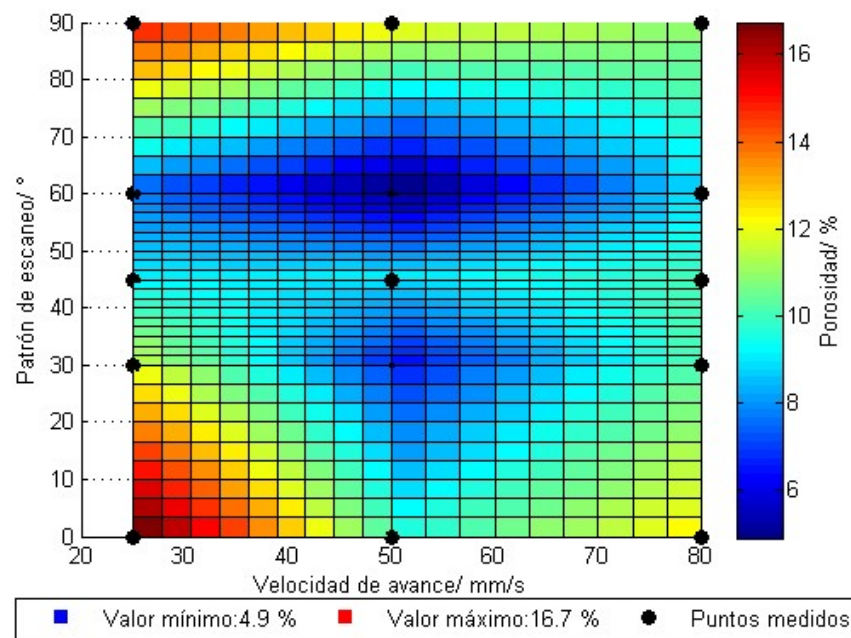


Figura 4-17: Porosidad en el segmento inferior de probetas sinterizadas a 190 W.

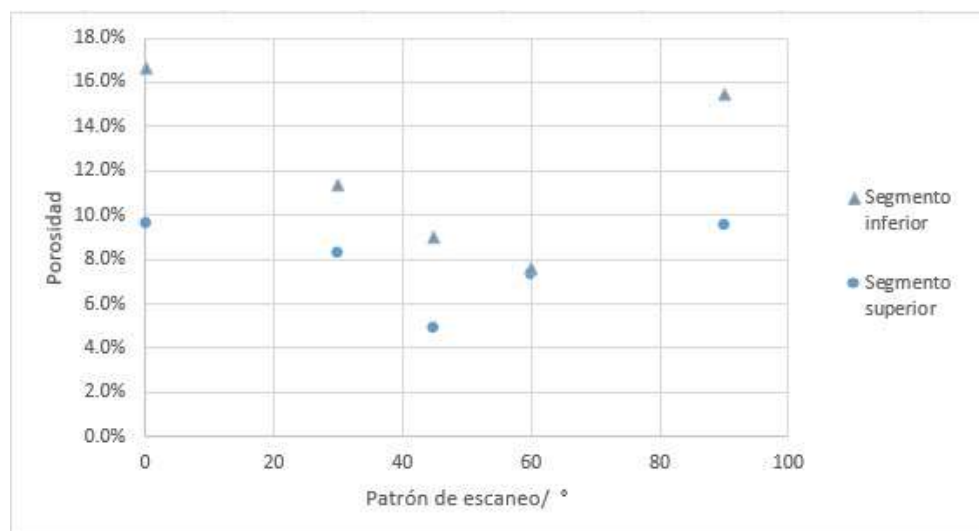


Figura 4-18: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 25 mm/s y sinterizadas a 190 W.

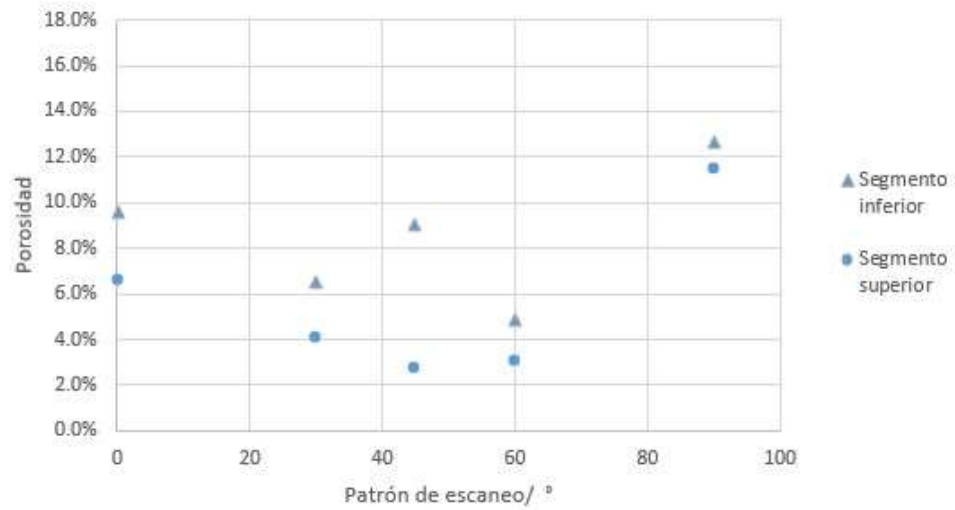


Figura 4-19: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 50 mm/s y sinterizadas a 190 W.

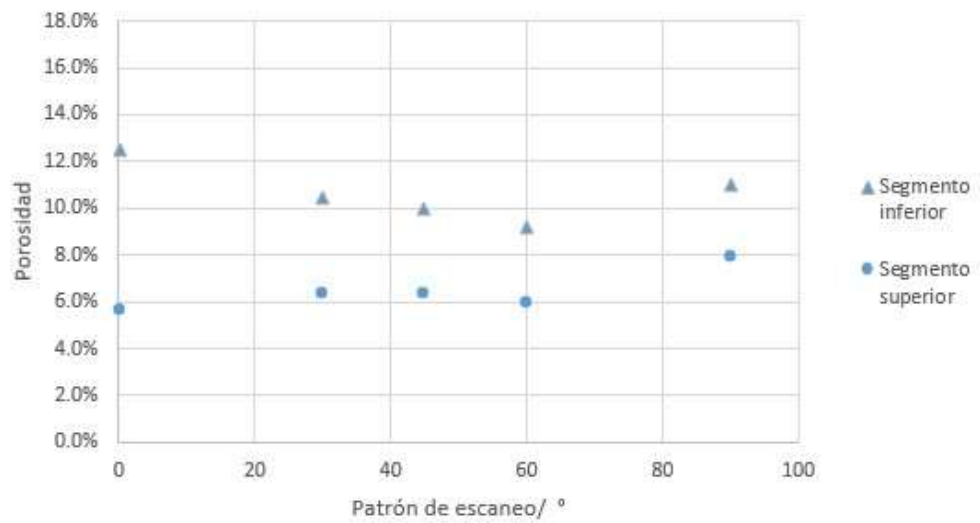


Figura 4-20: Porosidad en la parte superior e inferior de probetas generadas a una velocidad de escaneo igual a 80 mm/s y sinterizadas a 190 W.



### 4.3 Resultados al variar la potencia de escaneo

#### 4.3.1 Espesor

Como se ve en la Figura 4-21, el espesor es mayor cuando la potencia es 260 W.

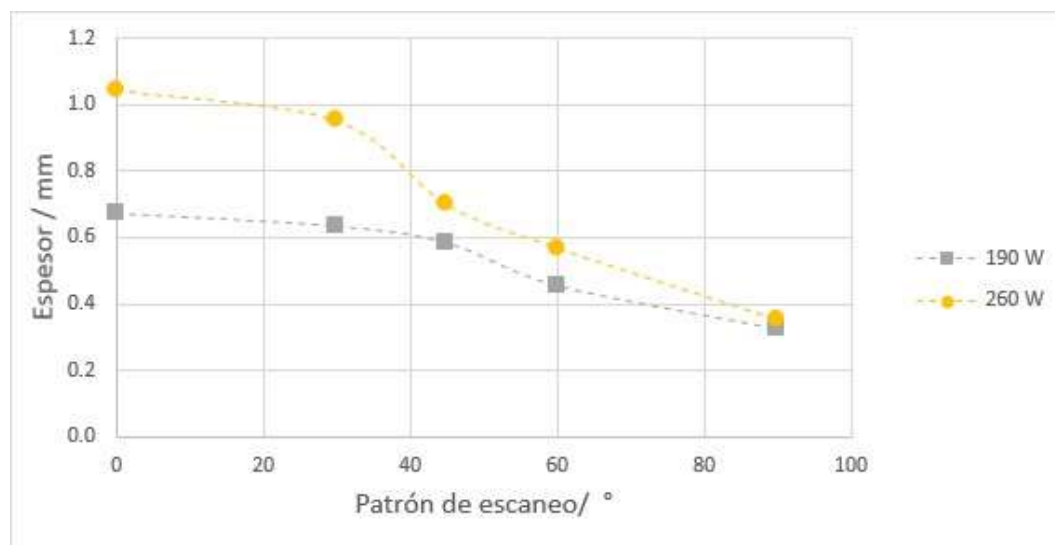


Figura 4-21: Comparación de espesor en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

#### 4.3.2 Densidad másica

La densidad másica obtenida es mayor para una potencia de 260 W que a 190 W bajo los mismos parámetros de sinterizado como se ve en la Figura 4-22.

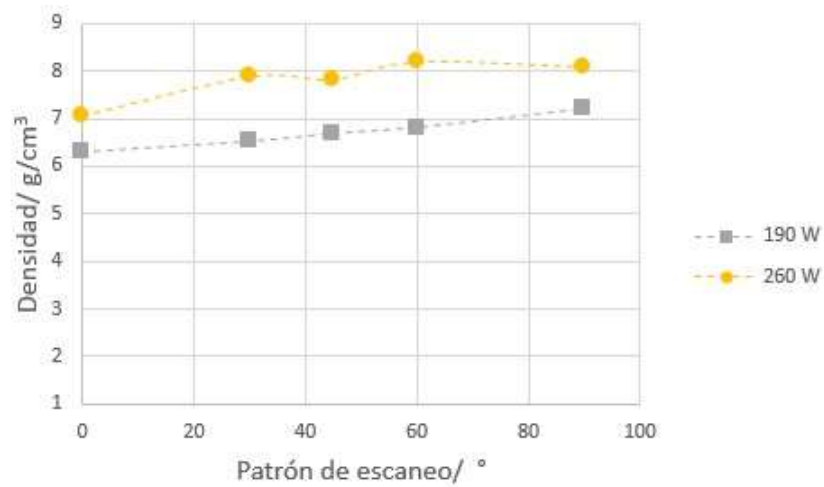


Figura 4-22: Comparación de densidades másicas en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

#### 4.3.3 Densidad másica relativa

En la Figura 4-23, se observa el mismo comportamiento descrito en la sección 4.3.2.

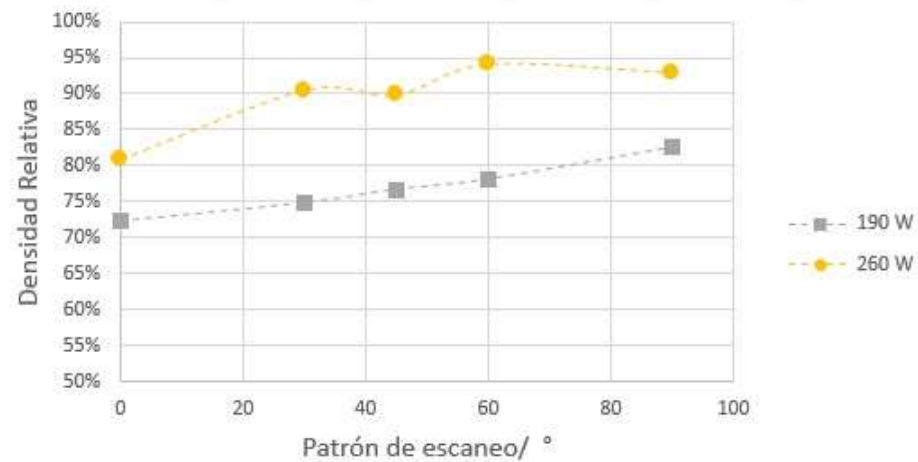


Figura 4-23: Comparación de densidad másica relativa en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

#### 4.3.4 Resistencia ultima a la tracción

Para patrones de escaneo de  $0^\circ$  y  $30^\circ$  la UTS es mayor a una potencia de 190 W y para el resto de los patrones es a 260 W como se muestra en la Figura 4-24.

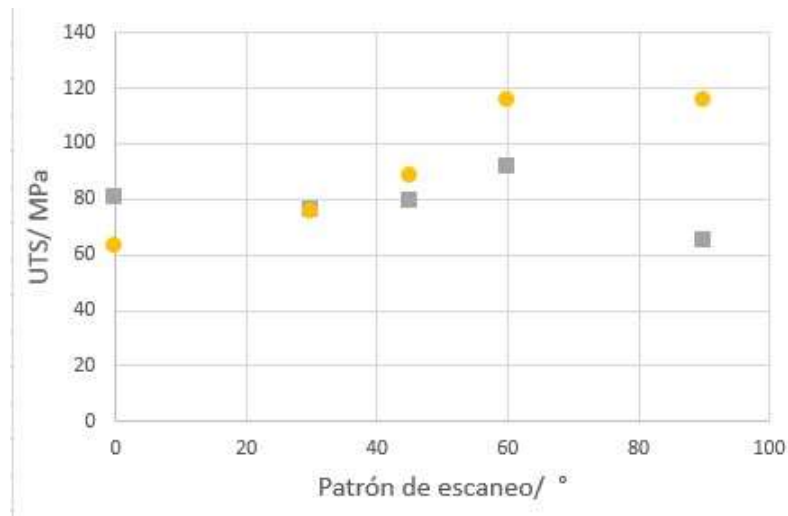


Figura 4-24: Comparación de UTS en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

#### 4.3.5 Tasa de derretimiento del polvo

Como se muestra en la Figura 4-25, para todos todas las velocidades y patrones de escaneo, la tasa de derretimiento es mayor a 260 W.

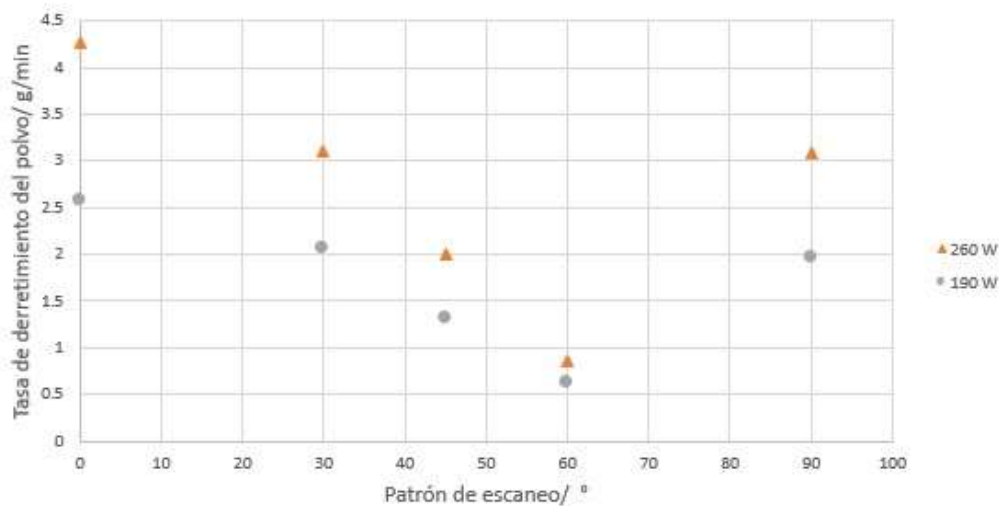


Figura 4-25: Comparación en la tasa de derretimiento en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

#### 4.3.6 Porosidad

La porosidad es menor en el segmento superior para las probetas sinterizadas a una velocidad de 80 mm/s y una potencia de 260 W de escaneo. Como se observa en las Figuras 4-26 y 4-27, la porosidad disminuye al utilizar una potencia mayor.

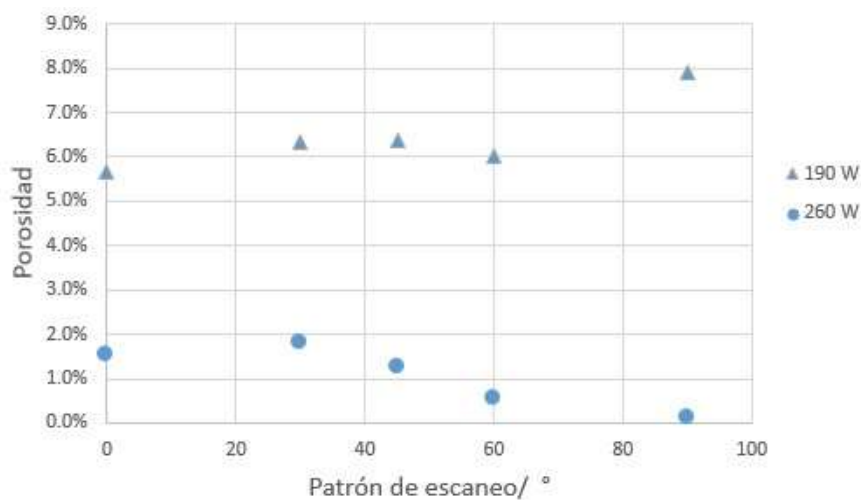


Figura 4-26: Comparación de porosidad en el segmento superior en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

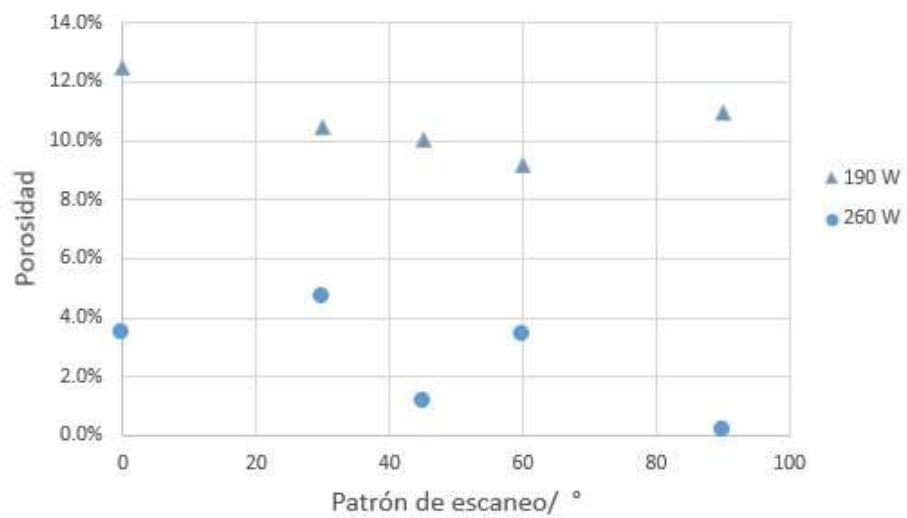


Figura 4-27: Comparación de porosidad en el segmento inferior en probetas generadas a 190 y 260 W a una velocidad de escaneo de 80 mm/s.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Resultados obtenidos al variar la velocidad escaneo

Se determinó que tanto el patrón como la velocidad de escaneo afectan de distinta forma las propiedades mecánicas de las probetas sinterizadas mediante láser. El efecto sobre cada propiedad se describe a continuación:

- El espesor de las probetas aumenta a medida que se disminuye la velocidad y el ángulo de patrón de escaneo. Esto se debe a que a menor velocidad y ángulo de patrón de escaneo, la concentración de calor en la probeta aumenta por lo explicado en la sección 3.3.6. El máximo espesor se obtuvo a una velocidad de 25 mm/s y un ángulo de patrón de escaneo igual a  $0^\circ$ , como se ve en el Anexo D.

- La densidad másica mostró el comportamiento inverso al espesor, a medida que se incrementó la velocidad y el ángulo del patrón de escaneo, esta aumentó. Se atribuye este comportamiento a que como se puede ver en la sección 4.2.6, la porosidad aumenta en sectores más lejanos de la superficie que interactúa con el haz del láser, por lo que al obtener probetas más delgadas, estas presentan menor porosidad.

Según el valor reportado por EOS GmbH, que se puede ver en la Tabla 2-1, la densidad másica alcanza  $7,6 \text{ g/cm}^3$  en sectores delgados y  $6,3 \text{ g/cm}^3$  en el núcleo, dado que las probetas no son delgadas, la densidad másica esperada máxima es de  $6,3 \text{ g/cm}^3$ . Como se puede ver en el Anexo D, este valor se igualó o superó en más de la mitad de los casos logrando densidades másicas de  $7,2 \text{ g/cm}^3$ . Es importante notar que los resultados reportados por EOS GmbH son para objetos con múltiples capas y no para una monocapa.

- La densidad másica relativa tiene el mismo comportamiento que las mediciones de la densidad másica previamente descritas, la densidad másica relativa máxima fue 82,5% a una velocidad de 80 mm/s con un ángulo de patrón de escaneo igual a  $90^\circ$  y la mínima fue 60,5% a 25 mm/s con un ángulo de  $0^\circ$ , como se puede ver en Anexos D.

- La UTS para todos los casos, excepto para el ángulo de patrón de escaneo igual a  $60^\circ$ , aumenta a medida que se incrementa la velocidad de escaneo. Si se comparan estos resultados con la variación en la concentración de calor mostrada en la sección 3.3.6, se puede ver que la UTS aumenta a medida que la concentración de calor disminuye, esto se ve complementado por el efecto del ángulo del patrón de escaneo y la orientación del ensayo de tracción uniaxial. A  $90^\circ$  la UTS disminuye dado que la concentración de calor aumenta para este patrón de escaneo.

Según lo reportado por EOS GmbH, mostrado en la Tabla 2-1, la resistencia máxima del material es de 400 MPa, pero como se puede ver en el Anexo D la UTS máxima obtenida fue de 100,9 MPa a una velocidad de 50 mm/s con un ángulo de patrón de escaneo igual a  $60^\circ$ . Es importante notar nuevamente que los resultados reportados por EOS GmbH son para objetos con múltiples capas y no para una monocapa, esto puede explicar la diferencia obtenida.

- La tasa de derretimiento de polvo aumenta para todos los patrones cuando la velocidad de escaneo aumenta, es interesante observar que para todas las velocidades se produce una disminución notoria en la tasa de derretimiento a un ángulo de patrón de escaneo igual a  $60^\circ$  como se puede apreciar en la Figura 4-15. Se puede ver que la variación en la tasa de derretimiento, según el patrón de escaneo, coincide con la variación en la concentración de calor mostrada en la sección 3.3.6. Debido a esto, es probable que la tasa de derretimiento continúe disminuyendo a medida que el ángulo en el patrón de escaneo aumente, esto se cumpliría hasta que el ángulo de patrón de escaneo tome valores cercanos a  $90^\circ$ , ya que para este caso (ángulo de patrón de escaneo igual a  $90^\circ$ ) la concentración de calor aumenta como se ve en la Figura 3-10, esto último sería la causa del aumento en la tasa de derretimiento a este patrón de escaneo.

La mayor tasa de derretimiento es de 2,51 g/min que se obtiene a una velocidad de 80 mm/s con un ángulo de patrón de escaneo igual a  $0^\circ$ , lo cual es consistente con la acumulación de calor. El resto de los resultados se pueden ver en el Anexo D.

- La porosidad para todos los casos fue menor en el segmento superior que en el inferior como se ve en las Figuras 4-18, 4-19 y 4-20. No existe una tendencia clara que relacione la velocidad y el patrón de escaneo con la porosidad en la probeta, y tampoco se aprecia una relación entre la porosidad del segmento superior e inferior. Según reporta EOS GmbH la porosidad mínima esperada es de un 8%, en el segmento superior se obtuvo porosidades inferiores a esto, llegando a 2,8% para una velocidad de 50 mm/s y un ángulo de patrón de escaneo igual a 45°.

## 5.2 Resultados obtenidos al variar la potencia de escaneo

Se determinó que tanto el patrón como la potencia de escaneo afectan de distinta forma las propiedades mecánicas de las probetas sinterizadas mediante láser. El efecto sobre cada propiedad se describe a continuación:

- Como era de esperar (Song, Yang, Liu, Luo, & Yu, 2015), el espesor de las probetas aumentó junto con el incremento de la potencia del láser y disminuyó a medida que se incrementó el ángulo del patrón de escaneo, lo primero se atribuye a que la concentración de calor aumenta a medida que la potencia del láser aumenta, esto se ilustra en la Figura 3-10 y lo segundo a lo ya descrito en la sección 5.1.

El espesor máximo para las probetas obtenidas a 190 y 260 W se obtienen para el mismo ángulo de patrón de 0°, los valores para estos casos son 0,67 mm y 1,05 mm respectivamente, los demás valores se pueden encontrar en el Anexo D. La diferencia máxima de espesores para un mismo patrón de escaneo es de 0,38 mm obtenida a un ángulo de patrón de escaneo de 0°. A medida que el patrón de escaneo aumenta, esta diferencia disminuye, esto se debe a que la diferencia en la concentración de calor a dos potencias distintas disminuye a medida que se incrementa el ángulo de patrón de escaneo como se ilustra en la Figura 3-10.

- Como se esperaba (Macedo & Hernandez, 2002; Tang et al., 2003), la densidad másica es mayor en las probetas sinterizadas a mayor potencia, esto se atribuye a la disminución de porosidad mostrada en la sección 4.3.6.



Se esperaba este resultado por los motivos descritos en la sección 2.1, resultados similares fueron obtenidos por Tang. Y. y Solares. Z. en otros materiales y en procesos de sinterizado de múltiples capas. Para ambos casos aumenta la densidad másica a medida que el ángulo del patrón de escaneo aumenta, por los motivos ya descritos en la sección 5.1. La densidad másica relativa es aproximadamente 10% mayor para las probetas sinterizadas a 260 W en comparación a las sinterizadas a 190 W, esta diferencia se puede ver en el Anexo D, y la densidad másica relativa máxima obtenida fue de un 94% a 260 W y un patrón de escaneo de 60°.

- La UTS no siempre es superior cuando se utiliza mayor potencia, es posible que esto se deba a que exista vaporización de estaño dada la mayor concentración de calor y esto induzca defectos. Para ángulos de patrón de 0° y 30° la UTS es mayor a una potencia de 190 W y para los ángulos de patrón de 45°, 60° y 90° la UTS es mayor para las probetas generadas a 260 W. Al igual que los resultados expuestos en la sección 4.2.4, la mayor UTS a 260 W se obtiene para un ángulo de patrón de escaneo de 60° la cual es de 115 MPa, se atribuye a que el máximo se encuentre a 60° por el cambio en la concentración de calor y el efecto del ángulo del patrón de escaneo ya descrito en la sección 5.1.

- La tasa de derretimiento de polvo se incrementó al aumentar la potencia, lo cual es un resultado esperado por los fenómenos descritos en la sección 2.1 y por el aumento en la temperatura ilustrado en la Figura 3-10. Es interesante observar que la diferencia en la tasa de derretimiento de ambas potencias disminuye a medida que aumenta el ángulo del patrón de escaneo. Se puede ver en la Figura 3-10 que este comportamiento coincide con la variación en la concentración de calor, en la cual aprecia que la temperatura converge a medida que el ángulo del patrón de escaneo aumenta.

Igual que los resultados obtenidos al variar las velocidades de escaneo (sección 4.2) se obtuvo un mínimo en la tasa de derretimiento a 60°. Es probable que la tasa de derretimiento continúe disminuyendo hasta que el ángulo del patrón de escaneo se

encuentre cercano a  $90^\circ$ , donde se genera un aumento por los motivos descritos en la sección 5.1.

- Al incrementar la potencia existe una disminución en la porosidad, y dependiendo del patrón, se genera una diferencia que se encuentra entre 5 y 8% en el segmento superior y entre 5 y 10% en el segmento inferior. La porosidad mínima obtenida fue de 0,1% a 260 W y un ángulo de patrón igual a  $90^\circ$  como se muestra en la el Anexo D. La porosidad mínima reportada por EOS GmbH es de 8% lo cual es mayor a la obtenida; es probable que esta diferencia se deba a que la porosidad reportada por EOS GmbH es para casos con múltiples capas.

## 6. CONCLUSIÓN

Se lograron determinar los parámetros necesarios para operar el equipo experimental para realizar el estudio de SLS en monocapas. Además, fue posible construir una cámara en la cual se pudo mantener la atmósfera requerida para evitar la oxidación.

Se concluyó que tanto el tipo de patrón, velocidad y potencia láser de escaneo modifican las características y propiedades mecánicas de las probetas. Las principales conclusiones obtenidas son:

1. El tipo de patrón de escaneo juega un rol importante en el aprovechamiento térmico entre pasadas sucesivas dado que condiciona la distancia entre dos puntos consecutivos y el tiempo que tarda el láser en realizar cada pasada en el proceso de escaneo. Cuando el patrón tiene un ángulo de  $0^\circ$  es cuando existe un mayor aprovechamiento térmico, lo cual provoca que la tasa de derretimiento y el espesor de las monocapas sea mayor, para este mismo caso la concentración de calor aumenta, lo cual provoca mayor porosidad y menor densidad másica y UTS.
2. La velocidad del láser afecta el aprovechamiento del calor, pues condiciona el tiempo de difusión del calor entre puntos consecutivos. A medida que se incrementa la velocidad el aprovechamiento del calor aumenta, lo cual genera un aumento en la tasa de derretimiento. Además, debido a que a mayor velocidad disminuye la concentración de calor, se generan monocapas más delgadas, lo cual favorece la obtención de estas más densas y con mayor UTS, dado que la porosidad va aumentando en los puntos más distantes a la superficie que interactúa con el haz láser.
3. La potencia afecta el derretimiento de los elementos de bajo punto de fusión, por lo cual, al incrementar la potencia las monocapas presentan menor porosidad. Debido a que estas presentan una menor porosidad, la densidad másica y la UTS aumentan. Otro efecto del incremento en la potencia es que aumenta la concentración de calor, por lo cual la tasa de derretimiento es mayor, al igual que el espesor.

## BIBLIOGRAFIA

AnVi. (2015). A Overview on 3D Printing.

Benavente, R., & Ramos, J. (2009). *Procesamiento de polvos de Cu-Al mediante direct metal laser fabrication: diseño de cámara de control atmosférico y caracterización de las aleaciones resultantes*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press.

Casavola, C., Campanelli, S. L., & Pappalettere, C. (2008). Experimental analysis of residual stresses in the selective laser melting process. In *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA*.

Darmadi, D., Norrish, J., & Tieu, A. K. (2011). Analytic and finite element solutions for temperature profiles in welding using varied heat source models. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 81(57), 154–162.

Despa, V., & Gheorghe, I. G. (2011). Study of selective laser sintering: a qualitative and objective approach. *Scientific Bulletin of Valahia University Materials and Mechanics*, 6, 150–155.

Eisen, W. B., Ferguson, B. L., German, R. M., Iacocca, R., Lee, P. W., Madan, D., ... Trudel, Y. (1998). *Powder metal technologies and applications*. ASM International, Novelty, OH (United States).

EOS GmbH. (2004). *DirectMetal and Direct Steel materials for EOSINT M 250 Xtended*.

Fang, Z. Z. (2010). *Sintering of advanced materials* (Primera ed). Elsevier.

German, R. M. (1996). Sintering theory and practice. *Solar-Terrestrial Physics (Solnechno-Zemnaya Fizika)*, 568.

Herderick, E. (2011). Additive manufacturing of metals: A review. *Materials Science and*

*Technology Conference and Exhibition 2011, MS and T'11*, 2(176252), 1413–1425. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856301323&partnerID=40&md5=e02018d10b2ca37a7e2ae1773e4fcaec>

Ion, J. (2005). *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*, 576. <http://doi.org/0750660791>

IPG-Photonics. (2010). *Fiber Laser Model: YLR-10-1064-LP*. 50 Old Webster Road, Oxford, MA 01540.

Jiang, S., & Gutowski, T. (2015). Processing Rate Modeling for Selective Laser Melting. In *Processing Rate Modeling for Selective Laser Melting*.

Karg, M., Ahuja, B., Kuryntsev, S., Gorunov, A., & Schmidt, M. (2014). Processability of high strength aluminium-copper alloys AW-2022 and 2024 by laser beam melting in powder bed. In *25th Annual International Solid FreeForm Fabrication Symposium, Austin*.

Kruth, J. P. (1991). Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(2), 603–614. [http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6)

Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), 730–759. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>

Kruth, J.-P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(2), 730–759.

Laohaprapanon, A., Jeamwatthanachai, P., Wongcumchang, M., Chantarapanich, N., Chantawerod, S., Sitthiseripratip, K., & Wisutmethangoon, S. (2012). Optimal scanning condition of selective laser melting processing with stainless steel 316l powder. In

*Advanced Materials Research* (Vol. 341, pp. 816–820).

Linde. (2016). Safety data sheet - Argon, compressed.

Macedo, Z. S., & Hernandez, A. C. (2002). Laser sintering of  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  ferroelectric ceramics. *Materials Letters*, 55(4), 217–220.

Reyes, G., & Walczak, M. (2015). *Towards direct metal laser fabrication of Cu-Al-Ni shape memory alloys*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12), 1459–1468.

Sanz-Guerrero, & J, J. R. (2007). *Estudio del efecto de los parámetros del proceso direct metal laser fabrication en el grado de densificación alcanzado en probetas de cobre y cobre-titanio*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Song, C., Yang, Y., Liu, Y., Luo, Z., & Yu, J.-K. (2015). Study on manufacturing of W-Cu alloy thin wall parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 885–893.

Stevenson, A. (2010). *Oxford dictionary of English*. Oxford University Press, USA.

Tang, Y., Loh, H. T., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Lu, L., & Wang, X. (2003). Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1), 368–372.

Wang, Y. (2008). Mechanical properties and microstructure of laser sintered and starch consolidated iron-based powders.

Wohlers, T. T. (2000). *Rapid Prototyping & Tooling: State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates.

Zañartu, G., & Ramos, J. (2009). *Caracterización de propiedades mecánicas de material*

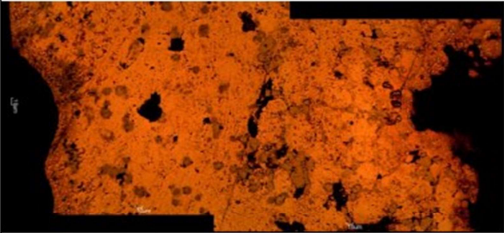

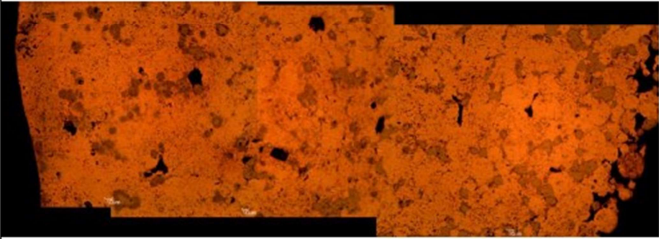
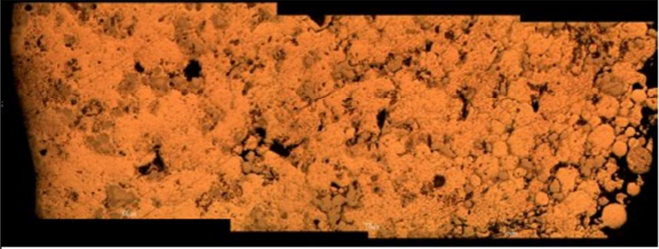

*particulado consolidado a través de un sistema de prototipado rápido experimental.*

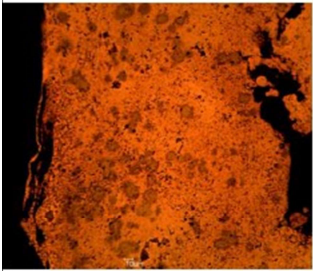
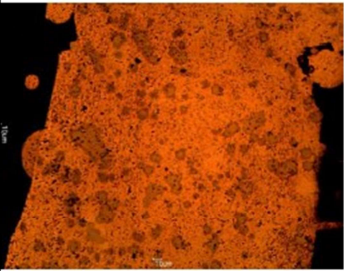
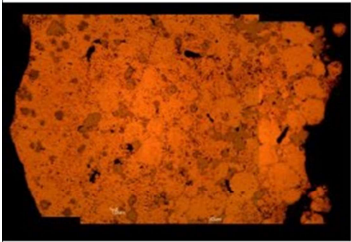
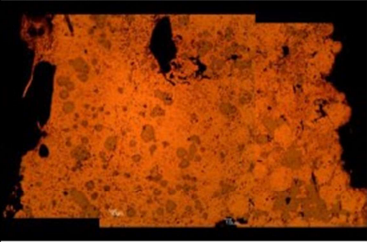
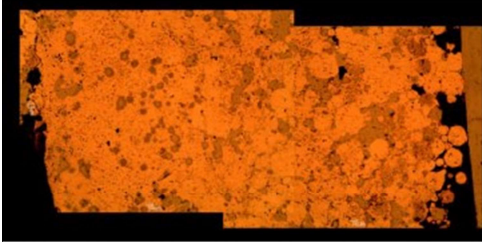
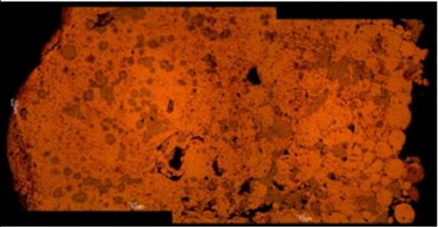
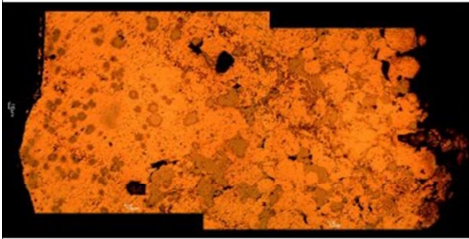
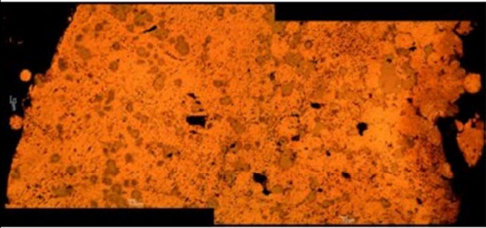


Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

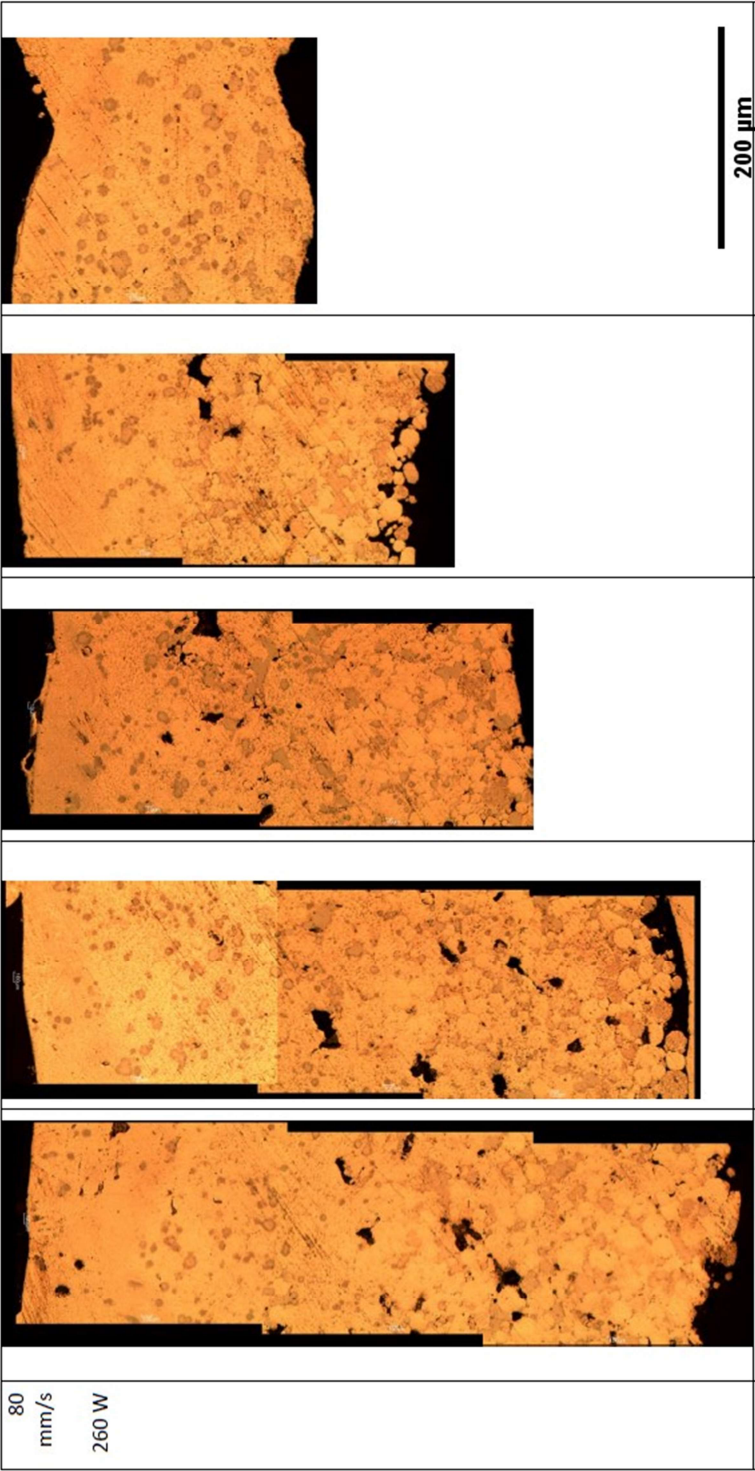
## **ANEXOS**



ANEXO A: IMÁGENES CORTE TRANSVERSAL

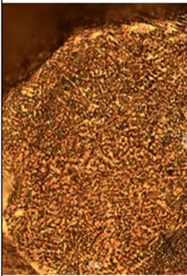

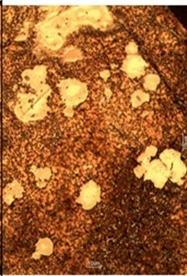
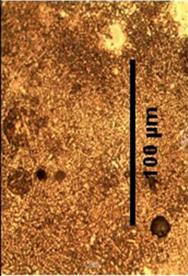
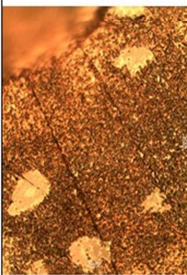
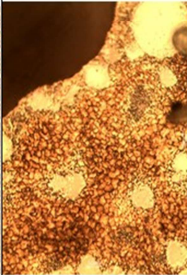


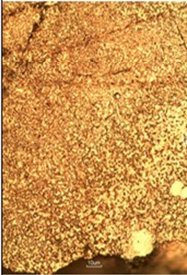
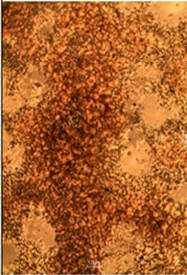
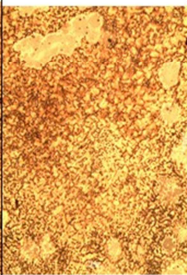
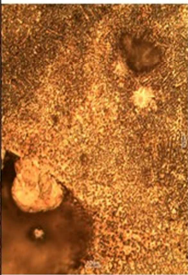
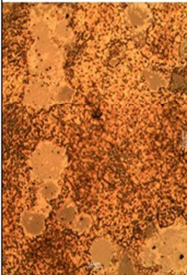
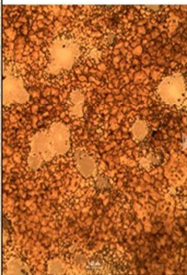
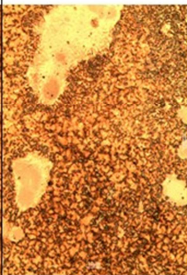
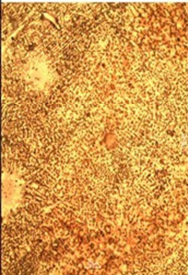
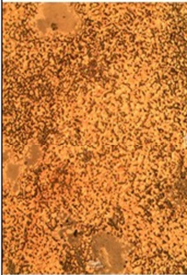
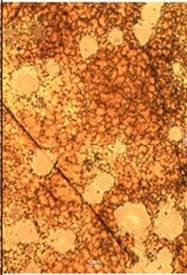
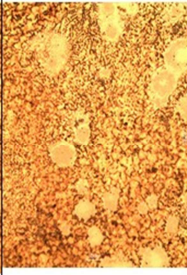

90°	
60°	
45°	
30°	
0°	
25 mm/s 190 W	

		 <div>200 <math>\mu</math>m</div>	
			
			
			
			
50 mm/s 190 W		80 mm/s 190 W	





ANEXO B: IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS

90°				
60°				
45°				
30°				
0°				
	25 mm/s 190 W	50 mm/s 190 W	80 mm/s 190 W	80 mm/s 260 W

**ANEXO C: IMÁGENES PROBETAS**

Probetas sinterizadas a una velocidad de 25 mm/s y 190 W de potencia de escaneo.

0°	
30°	
45°	
60°	
90°	



Probetas sinterizadas a una velocidad de 50 mm/s y 190 W de potencia de escaneo.








Probetas sinterizadas a una velocidad de 80 mm/s y 190 W de potencia de escaneo.





Probetas sinterizadas a una velocidad de 80 mm/s y 260 W de potencia de escaneo.

0°	
30°	
45°	
60°	
90°	



## ANEXO D: RESULTADOS NUMÉRICOS

Espesor de probetas generadas a 190W.

Espesor/ mm	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	0,96	0,87	0,87	0,61	0,55
50 mm/s	0,66	0,60	0,59	0,44	0,35
80 mm/s	0,67	0,63	0,58	0,46	0,33

Densidad másica de probetas generadas a 190W.

$\rho_{\text{Experimental}}/ \text{g/cm}^3$	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	5,28	5,91	6,13	6,41	6,20
50 mm/s	5,92	6,30	6,65	6,51	6,39
80 mm/s	6,30	6,52	6,69	6,81	7,20

Densidad másica relativa de probetas generadas a 190 W.

$\rho_{\text{rel}}/ \%$	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	60,5	67,8	70,3	73,5	71,1
50 mm/s	67,9	72,2	76,2	74,6	73,3
80 mm/s	72,2	74,8	76,7	78,1	82,5

UTS de probetas generadas a 190 W.

UTS/ MPa	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	42,28	46,57	58,42	76,84	36,69
50 mm/s	73,31	73,76	83,82	100,87	73,95
80 mm/s	80,53	76,07	78,97	91,76	64,89

Tasa de derretimiento en probetas generadas a 190 W.

$\dot{m}$ / g/min	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	1,42	1,09	0,78	0,62	1,12
50 mm/s	1,85	1,54	1,02	0,81	1,48
80 mm/s	2,57	2,39	1,86	1,24	1,96

Porosidad segmento superior de probetas generadas a 190 W.

Porosidad/%	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	9,7	8,3	5	7,4	9,6
50 mm/s	6,6	4	2,8	3	11,5
80 mm/s	5,7	6,3	6,4	6	7,9

Porosidad segmento inferior de probetas generadas a 190 W.

Porosidad/%	0°	30°	45°	60°	90°
25 mm/s	16,7	11,3	9	7,58	15,5
50 mm/s	9,5	6,5	9	4,89	12,6
80 mm/s	12,4	10,4	10	9,20	10,9

Resultados obtenidos para probetas generadas a una velocidad de escaneo de 80 mm/s a una potencia de 260 W.

	0°	30°	45°	60°	90°
UTS/ MPa	63,05	75,49	88,04	115,79	115,59
Espesor/ mm	1,05	0,95	0,70	0,57	0,35
$\rho_{\text{Experimental}}$ / g/cm <sup>3</sup>	7,05	7,89	7,83	8,20	8,10
$\rho_{\text{rel}}$ / %	80,87	90,40	89,76	94,02	92,87
$\dot{m}$ / g/min	4,26	3,59	2,83	1,70	3,09
Porosidad/ %					
-Segmento superior	1,5	1,8	1,3	0,5	0,1
-Segmento inferior	3,5	4,7	1,2	3,4	0,2