

## Desarrollo de impresión 3D láser de lecho de polvos en coordenadas polares y su comparación con impresión 3D láser convencional cartesiana: caracterización mecánica de argollas impresas en acero 316L

Jorge Andrés Ramos Grez<sup>1,2</sup>, Maximiliano López Norambuena<sup>1</sup>, Ignacio Jeria Pérez<sup>1</sup>, Domingo Gallardo Saavedra<sup>1</sup>, Matías González Aguilera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.  
Email: jramos@ing.puc.cl

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Nanotecnología y Materiales Avanzados, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

### Resumen

La impresión 3D láser de lecho de polvos realizada usando coordenadas polares, llamada *Spiral Growth Manufacturing* (SGM), permite fabricar piezas de revolución axi-simétricas en menor tiempo en comparación con la impresión láser convencional cartesiana o *Selective Laser Melting* (SLM). El estudio consideró la fabricación por impresión 3D láser tanto polar (SGM) como cartesiana (SLM), de argollas a partir de polvo de acero AISI 316L. Estas fueron comparadas dimensional, mecánica y térmicamente. Las argollas tienen un diámetro nominal exterior de hasta 75 mm e interior de 45 mm. Resultados indican que la precisión dimensional geométrica, la densidad específica y nominal de las argollas polares es muy cercana a las obtenidas mediante el proceso cartesiano, pero que la resistencia máxima es menor producto de una baja adhesión de la capa continua espiral. La eficiencia de construcción de las argollas impresas polarmente es en promedio 5% mayor que la de las argollas cartesianas.

**Palabras clave:** Coordenadas Polares, Selective Laser Melting, Fundición Láser de Lecho de Polvos, Acero AISI 316L, Propiedades Mecánicas.

### Abstract

Powder bed laser 3D printing performed using polar coordinates, called *Spiral Growth Manufacturing* (SGM), allows manufacturing axi-symmetric revolution parts in less time compared to conventional cartesian laser printing or *Selective Laser Melting* (SLM). In the present work, a device to perform SGM operating under polar coordinates is presented. The study considered the manufacture by 3D laser printing, both polar (SGM) and cartesian (SLM), of rings from AISI 316L steel powder. These were compared dimensionally, mechanically and thermally. The rings have a nominal outer diameter of up to 75 mm and inner one of 45 mm. Results indicate that geometric dimensional precision, specific and nominal density of the polar rings is very close to those obtained through cartesian process, but the maximum strength is lower due to less adhesion of the continuous spiral layer. Construction efficiency of rings by polar printing is on average 5% higher than for cartesian obtained rings.

### Keywords:

Polar Coordinates, Selective Laser Melting, Powder Bed Laser Smelting, steel AISI 316L, Mechanical Properties.

### 1. Introducción

La impresión 3D usando láser y lecho de polvos metálicos es una tecnología ya establecida en el mercado de la manufactura aditiva [1]. Su funcionamiento actual se basa en movimientos tridimensionales dentro de un sistema de coordenadas cartesiano (*i.e.*,  $x$ - $y$ - $z$ ). Lo anterior permite fabricar objetos complejos a través de múltiples capas de polvo metálico, las que son aplicadas discreta y secuencialmente (generalmente en dirección vertical). Un láser de alta potencia y focalizado es actuado mediante espejos galvanométricos en las direcciones  $x$  e  $y$  sobre un plano horizontal y con elevación en  $z$ ; fundiendo el polvo selectivamente en cada capa (dando

así al proceso su nombre en inglés: *Selective Laser Melting* o SLM). Alternativamente, desde el año 2005 [2], investigadores han trabajado la idea de sistemas de dispensación del polvo de manera rotatoria o en coordenadas polares, dando así paso a un proceso de capa de polvo continua. En la Universidad de Liverpool, Egan (2007) propone una nueva técnica de impresión a partir de una capa continua en forma de espiral. El la bautiza como *Spiral Growth Manufacturing* o SGM, traducido al español como manufactura de crecimiento en espiral [3]. Este método se basa en el *Selective Laser Melting*, solo que, al ser impresa la pieza de forma continua, producto de la rotación de la cama de polvos, los esfuerzos térmicos a

los que se somete la pieza deberían equilibrarse, mejorando las propiedades mecánicas resultantes respecto a sus homólogos. Posteriormente, Zañartu y Ramos. (2010), diseñaron y construyeron un equipo que funciona bajo impresión en espiral. En la oportunidad confeccionaron argollas en base a polvos cerámicos (*e.g.*, sulfato de calcio) [4]. Bajo la misma línea de investigación, Vera (2018), rediseña el dispositivo anterior y crea un prototipo para la consolidación de polvo fundido mediante láser con atmósfera controlada, aquí nuevamente, los ejes de trabajo son en coordenadas cilíndricas y no cartesianas. Lográndose argollas hechas a partir de una aleación de Cu-Ni-Sn con espesores de capa entre 400 a 600  $\mu\text{m}$  (Figura 1) y a una velocidad angular de una revolución por minuto [5]. Comprobándose así la factibilidad técnica del método, más no aún su efectividad a nivel de proceso y piezas fabricadas. Más recientemente en 2020 [6], Carter *et al.* ha comenzado a investigar la tecnología SGM en la manufactura de piezas de motores de aviación y de gran tamaño.



Figura 1. Argolla impresa usando sistema SGM indicando el concepto de la capa continua producida durante la impresión polar (la muestra en este caso no logró la adhesión de la capa continua) [5].

Según González *et al.* (2022), quien realizó el tratamiento de derretimiento superficial de argollas metálicas de acero 316L, los campos térmicos difieren entre el proceso cartesiano y el polar, debido a que la trayectoria del recorrido del haz láser sobre la superficie de la capa de polvos es diferente en cada esquema de procesamiento [7]. Lo anterior afecta los gradientes térmicos y las razones de enfriamiento localmente. Se espera que lo anterior tenga un impacto favorable en el control de las tensiones residuales evitando, por ejemplo, los post-tratamientos térmicos de recuperación o recocido comúnmente empleados hoy en piezas impresas con láser en procesos cartesianos.

En el año 2018, el Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de la Pontificia Universidad Católica de Chile se adjudica un fondo BRAIN Chile (Centro de Innovación UC – Santander) para mejorar el prototipo SGM desarrollado originalmente por Zañartu y Vera. Un año más tarde, se obtiene un fondo de inversión importante para continuar el desarrollo del sistema de impresión polar, a través de la Fundación

COPEC-UC. Durante este proyecto, llamado AMLAPS (Advanced Metal Laser Additive Printing System), se mejoraron las componentes mecánicas, electrónicas y de control, alcanzando parámetros de trabajo similares a los de impresoras 3D convencionales. Pero surge la interrogante de qué tanto mejoran las propiedades mecánicas de las piezas al imprimirlas utilizando un sistema con movimiento polar en vez de uno cartesiano. Así el proyecto de investigación ANID FONDECYT 1201068, busca contrastar los resultados del proceso SGM contra piezas metálicas equivalentes pero fabricadas por SLM en una impresora 3D comercial: **GE - Concept Laser MLab-200R**; disponible en la misma institución gracias al proyecto ANID FONDEQUIP EQM 180081.

En el presente trabajo se presentan los resultados preliminares de la medición de las características dimensionales de las piezas impresas con ambas tecnologías, la densidad específica y nominal utilizando el método de Arquímedes, y el ensayo uniaxial de tracción (adaptado para eslabones de cadenas). A partir de estos resultados se ha podido estimar y comparar la eficiencia de construcción (*i.e.*, mass rate efficiency [8]) entre ambos procesos y correlacionar estos valores con la densidad de energía volumétrica utilizada.

La eficiencia de razón de masa, o eficiencia de construcción, está dada por la Eq. (1) [8] y se define como el cociente entre la razón de la masa real y la razón de la masa teórica. La primera se obtiene del resultado experimental masando la pieza y registrando el tiempo de impresión efectivo (restando los tiempos muertos, *e.g.*, tiempo para esparcir el polvo en el proceso SLM). La segunda corresponde a la máxima cantidad de masa posible por unidad de tiempo que el sistema puede fundir considerando condiciones adiabáticas a partir de la potencia  $P$  de la fuente de calor aplicada sobre la superficie del material y las propiedades termo físicas del polvo.

$$\eta_m = \frac{m_{real}}{m_{teórica}} = \frac{\Delta m / \Delta t}{P / (C_p \Delta T_f + \Delta h_f)} \quad (1)$$

Por otro lado, la densidad volumétrica de energía para un sistema cartesiano viene dada por la Eq.(2) [1], y se calcula como el cociente entre la potencia de la fuente de calor  $P$  y el producto entre la velocidad de escaneo ( $v$ ), espesor de capa ( $h$ ) y el espaciado entre líneas de pasada del láser ( $\phi$ ).

$$E_{d-SLM} = \frac{P}{v \cdot e \cdot \phi} \quad (2)$$

Para un sistema polar, al contrario es necesario incluir la velocidad de avance promedio del frente de calor la cual es función de las  $rpm$  y del largo medio de la línea de calor (en el caso de una argolla, corresponderá a un cuarto de la diferencia entre los diámetros exterior  $d_e$  e interior  $d_i$ ). La expresión viene dada por la Eq (3) [9].

$$E_{d-SGM} = \frac{4P}{\pi \cdot rpm \cdot e \cdot (d_e^2 - d_i^2)} \quad (3)$$

Finalmente, las variables de entrada de los procesos SGM y SLM, se ajustan de forma que sean comparables a las mediciones y ensayos de laboratorio, para estudiar el efecto en las dimensiones resultantes, densidad específica y la resistencia máxima entre ambos métodos; y se pueda además, comparar la eficiencia de construcción entre ambos procesos.

## 2. Métodos

En la Figura 2 se ilustran los parámetros de entrada del proceso de impresión SGM usando láser tales como la potencia del láser ( $P$  en watts), velocidad de escaneo ( $v$  en mm/s), espesor de capa ( $e$  en mm), y las rpm de la cama de polvos; lo anterior para una cierta altura ( $h$ ) y diámetro exterior ( $d_e$ ) e interior ( $d_i$ ) de la argolla. Estos parámetros permitirán generar argollas metálicas tal que se puedan comparar según los valores de la variables de salida: dimensiones obtenidas, resistencia máxima a la tracción, densidad específica y nominal, y la eficiencia de construcción.

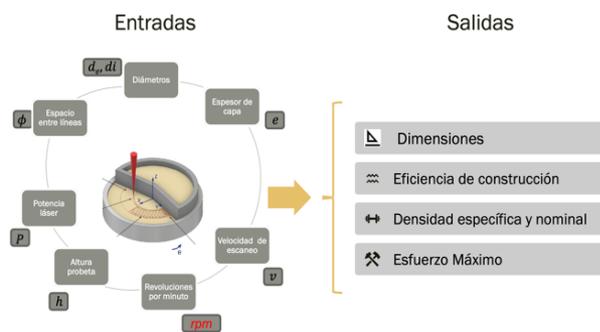


Figura 2. Conjunto de parámetros de entrada al proceso SGM y las propiedades de interés de salida.

### 2.1. Patrones de escaneo del láser

La Figura 3 ilustra la comparación entre los patrones de escaneo del haz láser entre un proceso cartesiano y uno polar. El patrón de escaneo cartesiano es dependiente del ángulo de escaneo con respecto de la geometría de la sección recta de la pieza, y muestra que hay segmentos lineales de calor muy largos y otros muy cortos. En el caso del proceso polar, los segmentos son más cortos, simétricos y constantes en largo. Lo anterior tiene un efecto en lo que respecta a la acumulación del calor en cualquier punto de la superficie, puesto que a mayor largo de la línea de calor, el tiempo de espera entre pasadas consecutivas de la fuente de calor es mayor y por lo tanto hay más tiempo para que el calor se disipe hacia las zonas frías [10], aumentando la tasa de enfriamiento generando tensiones residuales de mayor magnitud.

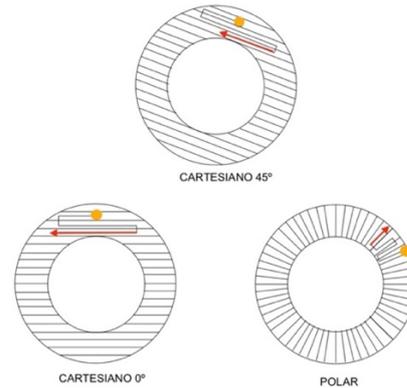


Figura 3. Esquema de los patrones de escaneo del láser.

### 2.2. Sistemas de impresión polar y cartesiano

Los dos sistemas de impresión 3D mediante láser y cama de polvos (polar y cartesiano) se describen a continuación y se muestran resultados preliminares de la impresión de argollas en acero 316L mediante ambos sistemas.

#### 2.2.1. Sistema de impresión SGM (polar)

La Figura 4 muestra la integración del sistema SGM polar AMLAPS consistente en un láser IPG de fibra de 300W (1064 nm), un escáner x-y SINTEC, sistema de potencia y control, cámara de vacío y sistema de control electro-mecánico.



Figura 4. Sistema AMLAPS de impresión SGM y proceso de impresión en la esquina superior izquierda.

#### 2.2.2. Impresión SGM (polar)

La Figura 5 muestra una de las argollas impresas empleando el sistema polar AMLAPS. La argolla está anclada mediante derretimiento a una superficie rígida del mismo material. La argolla posee un diámetro interior nominal de 45 mm y exterior de 75 mm, fue fabricada a 1 rpm con una potencia láser de 216 W, focalizado a 75 micrones, con un espesor de capa de 200 micrones y una velocidad de escaneo del haz láser de 990 mm/s.



Figura 5. Argolla de acero 316L impresa en coordenadas polares sobre placa soporte.

La Tabla 1 presenta los parámetros utilizados en la fabricación de las argollas por el método SGM (polar). Los espesores de capa posibles de obtener fluctuaron entre 140 a 400 micrones. La potencia láser nominal varió entre 170 y 240 W, obteniéndose densidades volumétricas de energía de 6 a 32 J/mm<sup>3</sup>.

Tabla 1. Parámetros de procesamiento SGM (polar)

Muestra	Esquema	Espesor de Capa (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ancho (de - di) / 2 (mm)	rpm	Velocidad Escaneo (mm/s)	Potencia (W)	Densidad Energía (J/mm <sup>3</sup> )
3	SGM	0,233	75	15	1,0	990	170	15,5
6		0,241	75	15	1,0	990	240	21,1
8		0,241	70	15	1,0	990	190	18,3
10		0,140	60	10	2,0	990	216	29,5
11		0,200	70	15	2,0	990	216	12,5
12		0,170	60	10	1,5	990	216	32,4
13		0,170	60	10	2,0	990	216	24,3
15		0,400	70	15	2,0	990	209	6,0

### 2.2.3. Sistema de impresión SLM (cartesiano)

La Figura 6 muestra el sistema comercial de impresión 3D tipo SLM que opera bajo un esquema de coordenadas cartesianas. El sistema de marca GE - Concept Laser y modelo MLab 200R cuenta con un láser de fibra IPG de 200 W (1064 nm), un cabezal de escaneo x-y Super Scan con velocidad de hasta 7 m/s, un volumen de procesamiento de impresión de 10 cm x 10 cm x 10 cm, con un espesor de capa mínimo de 15 micrones.



Figura 6. Sistema GE MLab-200R de impresión SLM y proceso de impresión esquina inferior izquierda.

El sistema utiliza un recubridor que espase cada capa de polvos secuencialmente. La atmósfera interior de la cámara opera a 0,2% de O<sub>2</sub> a través de un sistema de retiro del aire por arrastre de flujo laminar de N<sub>2</sub> o Ar.

### 2.2.4. Impresión SLM (cartesiana)

La Figura 7 muestra una de las argollas impresas empleando el sistema cartesiano GE MLab-200R. Igualmente en este caso la argolla está anclada mediante derretimiento a una superficie rígida del mismo material. La argolla posee un diámetro nominal interior y exterior de 45 mm y 75 mm, respectivamente, y fue fabricada con una potencia láser nominal de 160 W focalizado a 75 micrones, un espesor de capa de 40 micrones y una velocidad de escaneo del haz láser de 640 mm/s.



Figura 7. Argolla de acero 316L impresa en coordenadas cartesianas sobre placa de soporte.

La Tabla 2 presenta los parámetros utilizados en la fabricación de las argollas por el método SLM (cartesiano). Los espesores de capa fluctuaron entre 30 a 100 micrones. La potencia láser nominal varió entre 140 y 200 W, obteniéndose densidades volumétricas de potencias de 25 a 83 J/mm<sup>3</sup>.

Tabla 2. Parámetros de procesamiento SLM (cartesiano) de las argollas impresas

Muestra	Esquema	Espesor de Capa mm	Diámetro Exterior (mm)	Ancho (de - di)/2 (mm)	Separación entre Líneas (mm)	Velocidad Escaneo (mm/s)	Potencia (W)	Densidad Energía (J/mm <sup>3</sup> )
1	SLM	0,050	75	15	0,080	1000	140	35,0
2		0,050	75	15	0,080	1000	140	35,0
4		0,030	75	15	0,066	1000	140	70,7
5		0,100	75	15	0,080	1000	200	25,0
9		0,040	75	15	0,075	640	160	83,3

## 2.3 Ensayos de caracterización

La Figura 8 ilustra los 3 ensayos de caracterización de las argollas realizados: medición de la geometría en mm, masado en gramos y resistencia última usando mordazas consistentes en eslabones de cadena.

### 2.3.1 Medición de dimensiones

Consistió en la medición de la altura y diámetros exterior e interior de las argollas usando un pie de metro con décimas de mm de precisión. Se tomaron 3 mediciones de cada parámetro dimensional y se reportó su promedio.

### 2.3.2 Masado

Se utilizó una balanza digital con precisión de céntimas de gramos para masar las argollas. Se repitieron 3 mediciones por cada argolla y se reportó su promedio.



Figura 8. Dimensionamiento, masado y tracción uniaxial de las argollas impresas mediante SGM y SLM.

### 2.3.3 Ensayo de tracción

Se utilizó una máquina de tracción universal Instron y se usaron mordazas con forma de eslabón como se indica en la Figura 8. Se aplicó una elongación uniaxial hasta alcanzar la fuerza máxima en kgf. Las probetas impresas mediante el proceso SLM (cartesiano) obtuvieron resultados de resistencia máxima muy cercanos al del acero 316L fundido. Las argollas impresas usando SGM (polar), presentaron una delaminación entre capas lo cual redujo considerablemente la resistencia máxima (Figura 9). El esfuerzo máximo se calculó a partir de la carga máxima en N dividida por el área de la sección recta total en  $\text{mm}^2$  de la argolla que resiste dicha carga. En este ensayo no se realizaron repeticiones por ser uno destructivo.



Figura 9. Ensayo de tracción uniaxial basado en cadenas.

### 2.3.4 Medición del perfil de temperatura

Adicionalmente, se utilizó un pirómetro (Raytek Marathon 2000 y un sistema de adquisición de datos análogo-digital National Instruments) para medir y registrar la temperatura en un punto fijo sobre la superficie de la argolla sobre la cual se aplicaron los patrones de escaneo cartesiano y polar. La Figura 10 muestra ambas configuraciones.

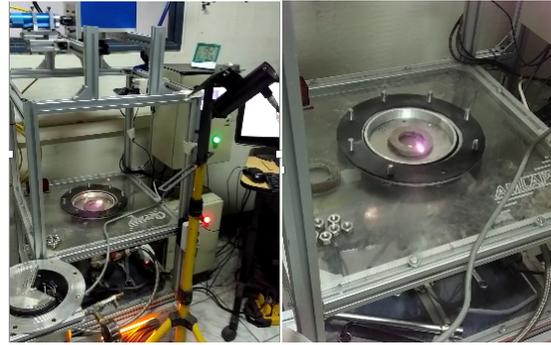


Figura 10. Medición temperatura superficial justo debajo del láser usando un pirómetro. Imagen izquierda se muestra proceso cartesiano e imagen derecha el proceso polar.

## 3. Resultados

Los resultados de la medición de las dimensiones geométricas, masado, resistencia máxima y tiempo de impresión permitieron el cálculo de la densidad específica y nominal, razones de masa y eficiencia de construcción de las argollas impresas; estos se presentan a continuación en las tablas 3 a 6. Complementariamente, se presentan los perfiles de temperaturas en un punto fijo sobre la superficie de una argolla en función del tiempo de avance de la fuente de calor y el tipo de patrón de escaneo utilizado (SGM o SLM).

### 3.1 Resultados de las dimensiones (altura y ancho), densidad específica y nominal, carga y esfuerzos máximos.

A partir de los resultados presentados en las tablas 3 y 4, se puede observar que la densidad específica y nominal resultantes son cercanas en ambos procesos.

Tabla 3. Resultados mecánicos de las argollas impresas usando SLM (cartesiano)

Muestra	Densidad Específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Densidad Nominal (%)	Altura h (mm)	Ancho (de - di) / 2 (mm)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	7920	99,2	8,95	15,40	1839	65,4
2	7928	99,3	7,80	15,18	1880	77,8
4	7530	94,3	9,65	15,03	5807	196,2
5	7900	98,9	4,14	15,15	1095	85,5
9	7800	97,7	4,39	14,70	4691	356,2

Tabla 4. Resultados mecánicos de las argollas impresas usando SGM (polar)

Muestra	Densidad Específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Densidad Nominal (%)	Altura h (mm)	Ancho (de - di) / 2 (mm)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo Máximo (MPa)
3	7830	98,0	6,77	15,06	81	3,9
6	7830	98,0	3,62	15,25	36	3,2
8	7710	96,5	2,89	14,81	42	4,8
10	7690	96,3	4,13	10,13	15	1,8
11	7340	91,9	9,94	15,03	81	2,7
12	7450	93,4	1,59	10,00	9	2,8
13	7360	92,1	1,34	9,80	2	0,7
15	5260	65,8	2,75	14,85	29	3,5

En relación a las dimensiones del ancho de la argollas, el proceso cartesiano tiende a sobre estimar levemente el valor nominal, mientras que el proceso polar lo subestima en ciertos casos. La resistencia máxima de las argollas SGM es un orden de magnitud menor que las SLM, estas últimas se acercan a los valores de la aleación de acero 316L fundida.

### 3.2 Resultados de masado, tiempo de impresión, razón de masa y eficiencia de construcción

A partir de los resultados presentados en las tablas 5 y 6 se puede observar que la eficiencia de construcción promedio del proceso SGM (18,2%) es 5% mayor que la del proceso SLM (13,1 %). El tiempo muerto entre aplicaciones de capa hace menos eficiente éste último.

Tabla 5. Resultados de eficiencia de construcción de las argollas impresas usando SLM (cartesiano)

Muestra	Masa Real (gr)	Tiempo Impresión (min)	Razón Masa Real (gr/s)	Razón Masa Teórica (gr/s)	Eficiencia Construcción (%)
1	148,1	107,3	0,023	0,164	14,0
2	152,2	92,6	0,027	0,164	16,5
4	187,7	222,4	0,014	0,164	8,5
5	71,0	24,3	0,049	0,234	20,9
9	91,1	171	0,009	0,164	5,5

Tabla 6. Resultados de eficiencia de construcción de las argollas impresas usando SGM (polar)

Muestra	Masa Real (gr)	Tiempo Impresión (min)	Razón Masa Real (gr/s)	Razón Masa Teórica (gr/s)	Eficiencia Construcción (%)
3	97,6	29	0,056	0,199	28,1
6	45,9	17	0,045	0,281	16,0
8	34,8	10	0,058	0,222	26,1
10	25,9	14	0,031	0,253	12,3
11	128,7	49	0,044	0,253	17,4
12	11,3	6	0,031	0,253	12,3
13	8,7	4	0,036	0,253	14,2
15	26,2	10	0,044	0,233	18,9

A partir de los resultados anteriores es posible graficar la eficiencia de construcción versus la densidad volumétrica de energía para los procesos SGM y SLM como se ilustra en la Figura 11. Se observa que para SGM es posible alcanzar una mayor eficiencia de construcción a densidades de energía más bajas que las usadas en SLM.

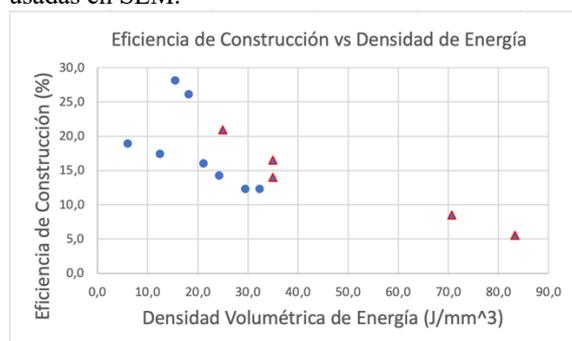
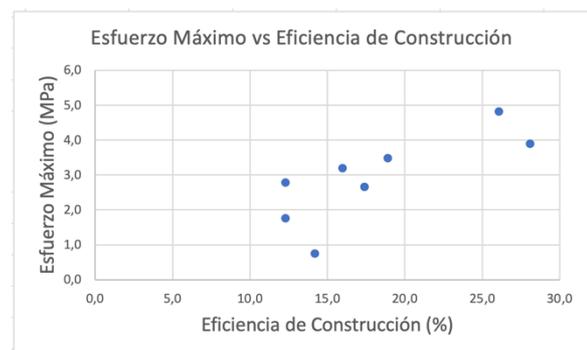


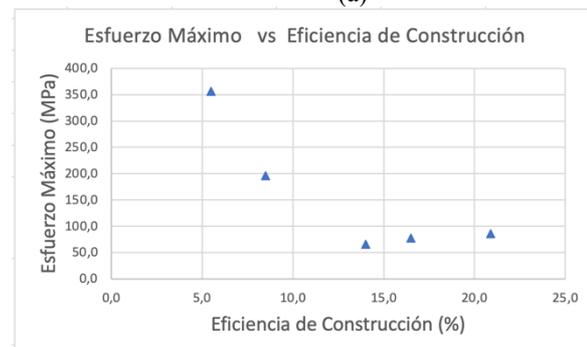
Figura 11. Eficiencia de construcción vs densidad de energía para proceso SGM (círculos) y SLM (triángulos)

La tendencia global es que a mayor densidad de energía menor es la eficiencia de construcción puesto que se utiliza una mayor potencia del láser lo que resulta en una mayor razón de masa teórica, lo que reduce la eficiencia de construcción, resultado previamente observado por Ramos-Grez *et al.* (2022) [9].

También es posible comparar la resistencia máxima de las argollas fabricadas por SGM y SLM versus la eficiencia de construcción de ambos procesos como se ilustra en la Figura 12 (a) y (b). En la primera, la tendencia para el proceso SGM es de una resistencia máxima creciente con la eficiencia de construcción. En el caso para el proceso SLM, se observa una tendencia contraria para la resistencia máxima. Una mayor eficiencia de construcción puede conllevar una menor adhesión entre capas, pues la potencia del láser utilizada tenderá a ser menor. En el caso del SGM, la baja adhesión producto de las capas gruesas usadas oculta el fenómeno, puesto que a mayor eficiencia de construcción, menor es la porosidad inducida al usarse una menor potencia del láser.



(a)



(b)

Figura 12. (a) Esfuerzo máximo vs eficiencia de construcción para proceso SGM (b) Esfuerzo máximo vs eficiencia de construcción para proceso SLM

### 3.3 Apariencia de las argollas antes y luego del ensayo de tracción.

La Figura 13 muestra 3 argollas impresas utilizando el procesamiento SGM (polar), usando distintos parámetros de fabricación (espesor de capa, rpm, potencia láser, tiempo total de impresión y eficiencia de construcción). Estas fueron posteriormente

ensayadas en tracción uniaxial hasta la carga máxima. Todas las argollas fallaron por fractura con un cierto porcentaje de deformación uniaxial y respectiva contracción lateral. Todas presentaron delaminación entre la capa continua lo cual debilitó su resistencia.

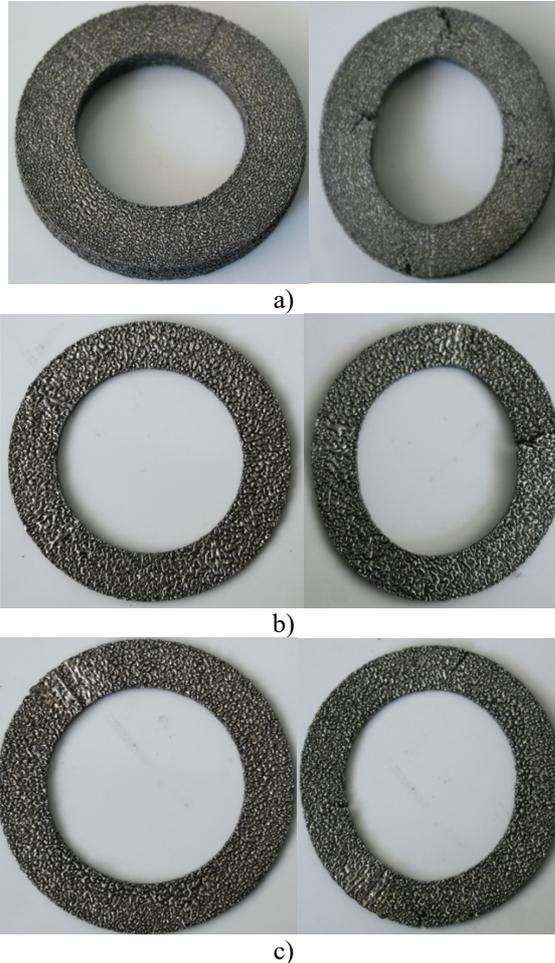


Figura 13. Argolla SGM (polar) antes y después de tracción uniaxial a) 0,240 mm, 1 RPM, 190 W, 49 minutos, 16% b) 0,170 mm, 1,5 RPM, 216 W, 6 minutos, 11,6% c) 0,170 mm, 2 PRM, 216 W, 4 minutos, 13,3%



Figura 14. Argolla SLM Cartesiana después de la tracción uniaxial: 40 micrones de espesor de capa, 171 minutos de fabricación, densidad volumétrica de energía 88,3 J/mm<sup>3</sup> y una eficiencia de construcción de 5,3%

La Figura 14 muestra una argolla impresa usando el sistema comercial SLM (cartesiano), la cual resistió

más carga que las mordazas utilizadas. Esta fue fabricada con capas de 40 micrones, 160 W, 640 mm/s un espacio entre líneas de 0,075 mm y una densidad de energía de 83,3 J/mm<sup>3</sup>.

### 3.4 Perfiles de temperatura

La Figura 15 ilustra la diferencia entre los perfiles de temperatura que experimenta un punto específico en la superficie de una argolla cuando esta es escaneada con un cierto patrón cartesiano o polar. Las argollas utilizadas poseen además alta y baja rugosidad superficial según los parámetros de fabricación, lo cual afecta el acople de la energía del láser en el material. La potencia y el tiempo de escaneo total sobre la superficie de la argolla fueron iguales en cada caso, lo que indica que la densidad de energía por unidad de volumen fue también la misma aplicada en cada patrón de escaneo. En el caso del patrón de escaneo SGM (polar), la temperatura se concentra en la vecindad del punto con un máximo de 670°C y 810°C para alta y baja rugosidad, respectivamente, justo por debajo del punto. En el caso del patrón de escaneo SLM (cartesiano), el perfil de temperatura en torno al punto se esparce en el eje del tiempo casi 3 veces con una temperatura máxima levemente menor justo por debajo del punto de medición de 630°C y 660°C, respectivamente.

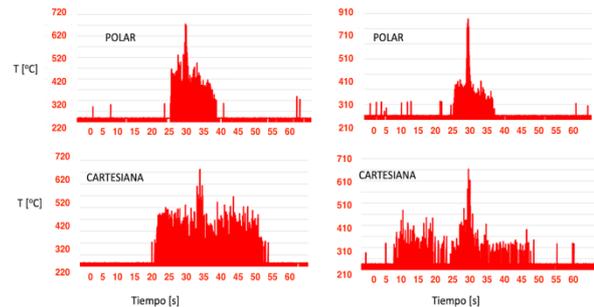


Figura 15. Perfil de temperatura en un punto medido con un pirómetro infrarrojo. Lado izquierdo, argolla con alta rugosidad superficial y lado derecho, argolla con baja rugosidad superficial

### 4. Conclusiones

Los resultados presentados aquí indican que la precisión geométrica y la densidad específica y nominal de masa de las argollas fabricadas usando el proceso SGM (polar) es muy cercana a las obtenidas por el proceso SLM (cartesiano), pero la resistencia máxima es considerablemente menor producto de una baja adhesión de la capa continua espiral.

La resistencia máxima de las argollas SLM es casi un orden de magnitud mayor que la obtenida en las argollas fabricadas con SGM. La tendencia de disminución de la resistencia máxima con la eficiencia de construcción es indicativa del efecto de un espesor de capa muy alto y una insuficiente potencia láser, lo que impacta negativamente la adhesión entre capas.

La baja adhesión entre la capa continua espiral se debe a que el espesor de la capa es todavía muy elevado, mucho mayor que 80 micrones, impidiendo un derretimiento completo y mayor adherencia entre las capas. No obstante, se observa un aumento en la resistencia máxima con la eficiencia de construcción (*i.e.*, mass rate efficiency).

Al contrario la eficiencia de construcción es en promedio 5% mayor para el proceso SGM (polar) que para el SLM (cartesiano). Pero la tendencia de disminución con la densidad de energía es observada en ambos procesos.

El perfil de la temperatura superficial de un proceso SGM (polar) es más concentrado y levemente más elevado que uno SLM (cartesiano).

El control del espesor de la capa continua es tal vez la variable más crítica por mejorar en el sistema actual AMLAPS, lo cual es una tarea no menor de diseño mecánico, transferencia de calor e integración de las componentes electromecánicas del sistema.

La comparación de la distribución de las tensiones residuales entre ambos procesos es el próximo paso a estudiar; adelantando, que el proceso SGM debiera concentrar más el calor, pues el tiempo de retraso del frente de calor en cada punto es más corto, lo cual aumentaría la temperatura localmente reduciendo los gradientes térmicos y produciendo un tratamiento térmico *in-situ* de recuperación, permitiendo aliviar las tensiones residuales en el objeto impreso.

## 5. Agradecimientos

BRAIN-Chile, Fundación COPEC-UC proyecto 2018.R.979, ANID FONDEQUIP EQM 180081 y ANID FONDECYT Regular 1201068.

## 6. Referencias

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B., (2010) Additive Manufacturing Technologies, 3<sup>rd</sup> Ed. Springer.
- [2] Hauser, C., Sutcliffe, C., Egan, M., & Fox, P. (2005). Spiral Growth Manufacturing (SGM) - A continuous additive manufacturing technology for processing metal powder by selective laser melting. SFF Symposium, Austin, Texas, USA.
- [3] Egan, M. J. (2007). Spiral growth manufacture: A continuous additive manufacturing technology for powder processing, Thesis, University of Liverpool, UK (Order No. U503176). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (898726319).
- [4] Zañartu-Apara, G., & Ramos-Grez, J. (2010). Characterization of the mechanical properties of samples fabricated by an experimental SGM device. Rapid Prototyping Journal, 16(5), 356–364.
- [5] Vera, J. (2018). Influencia de parámetros de operación en Sistema de impresión 3D basado en el crecimiento en espiral de objetos sólidos. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [6] Carter, W. T., Graham, M. E., Hayden, C. J., Jeong, Y., Mamrak, J., McCarthy, B. S., Monaghan, W. F., Nieters, E.,

Ostroverkhov, J., Roychowdhury, V., Schmitz, S., Shalaby, A.M. & Tucker, M. R. (2020). A large format DMLM system using a continuously rotating powder bed. Additive Manufacturing, 31.

[7] González, M., Ramos-Grez, J., Jeria I. Guerra, C., Solís, R. & Carvajal, L. (2022) Effects of laser surface modification on Stainless Steel 316L thin annular discs under radial and cartesian scans. Journal of Optics and Laser Technology, August.

[8] Gutowski *et al.* (2018) Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing. Journal of Industrial Ecology, 21, S1: 569-579.

[9] Ramos-Grez J.A., Vera, J., Walczak M. (2022) Spiral Growth Selective Laser Melting of axisymmetric objects from Cu-Ni-Sn alloy powder: a mass rate efficiency study. Enviado al Progress in Additive Manufacturing.

[10] Jain P.K., Pandey P.M., Rao P.V.M. (2009) Effect of delay time on part strength in selective laser sintering. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43:117–126.