



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO**

**PROPUESTA PARA EL ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO DE  
POLVOS DE ALEACIONES METÁLICAS UTILIZADOS EN  
PROCESOS DE MANUFACTURA ADITIVA LPBF**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ALAN BORBOLLA VÁZQUEZ**

**TUTOR PRINCIPAL:**

**DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA**

**LABORATORIO NACIONAL DE MANUFACTURA ADITIVA Y DIGITAL,  
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA, UNAM**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., SEPTIEMBRE DE 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Barba Pingarrón, Arturo

Secretario: Dra. Moock, Verena Margitta

Vocal: Dr. Ruiz Huerta, Leopoldo

1 er. Suplente: Dr. Siller Carrillo, Héctor Rafael

2 d o. Suplente: Dr. Elías Zúñiga, Alex

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital, MADiT. Instituto de Ciencias Aplicada y Tecnología, ICAT. UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

-----  
**FIRMA**

# AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no es más que la culminación de años de trabajo, durante los cuales he recibido el apoyo de múltiples personas y de las cuales siempre tuve el gusto de aprender cosas nuevas, por ello, inicié agradeciendo a todos lo que sin mención formaron una parte de mí durante este periodo.

Tengo un muy especial agradecimiento a mis padres, Marcela y Leonardo, que con gran esfuerzo siempre me han sustentado en todos los ámbitos en los que les ha sido posible, así como por soportar mis buenos y malos momentos siendo siempre una guía en instantes confusos. Así mismo a mi abuela María de la Luz por velar por mi bienestar en todo momento, a mi hermana Alejandra quien siempre me brinda palabras de aliento y a Odai, quien estuvo presente en cada momento de este trabajo.

Finalmente, esta investigación no hubiera sido posible sin la guía adecuada del Dr. Leopoldo Ruiz, a quien agradezco todo su apoyo y conocimiento que me brindó durante este recorrido. Al Dr. Alberto Caballero, gracias por compartir conmigo algo de su conocimiento durante cada comida. Y a la Maestra Ma. Eugenia Nogues, por siempre alentarme a seguir creciendo y aprendiendo.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>4</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>6</b>
Índice de tablas	8
Introducción	9
<b>1. Antecedentes</b>	<b>11</b>
1.1 Manufactura Aditiva	11
1.2 Fusión en cama de polvo (PBF del inglés Powder Bed Fusion)	12
1.3 Fusión láser en cama de polvo (LPBF-MA del inglés Laser Powder Bed Fusion for Metallic Alloys)	14
1.3.1 Parámetros de construcción	16
Atmósfera	16
Potencia del láser	17
Velocidad de escaneo	18
Espesor de capa	18
Patrón de escaneo	19
Cama de construcción	20
Energía	20
1.3.2 Áreas de oportunidad en la tecnología LPBF-MA	22
1.4 El polvo para el proceso LPBF-MA	24
1.4.1 Distribución de tamaño de polvo	26
1.4.2 Factor de forma del polvo	29
1.4.3 El reuso del polvo	30
<b>2. Planteamiento del problema</b>	<b>33</b>
2.1 Objetivo	33
2.2 Alcances	33
<b>3. Propuesta para determinar el envejecimiento del polvo</b>	<b>34</b>
Solidificación y descarte del polvo constante (Ejemplo 1, 50% de polvo disponible).	35
Solidificación y descarte variable (Ejemplo 2, con valores de 20% y 80%)	40

3.1 Propuesta experimental	42
3.2 Mallas	43
3.3 Microscopio Electrónico de Barrido	44
3.4 Geometrías sugeridas	44
4. Caso de estudio	45
<b>5. Conclusiones</b>	<b>52</b>
6. Glosario de términos nuevos	53
<b>7. Referencias</b>	<b>53</b>

# Índice de figuras

Figura 1.2-1: Esquema general del proceso de PBF.	14
Figura 1.3-1: Representación general de algunos de los parámetros de construcción que modifican las propiedades mecánicas y velocidad de la pieza construida.	15
Figura 1.3.1-1: Descripción esquemática de la distribución de temperatura de un láser de CO <sub>2</sub> (a) y un láser de Nd-YAG (b) [14].	17
Figura 1.3.1-2: Patrones de escaneo del haz láser sobre el polvo metálico en el plano XY (ortogonal a la dirección de construcción): a) unidireccional o concurrente, b) bidireccional, serpenteante o contracorriente, c) puntos de fusión (para haz pulsante), d) hélice, e) hélice hexagonal, puntos de contorno o relleno de serpiente y f) islas o tablero de ajedrez.	20
Figura 1.3.2-1. Morfología de los poros observado en la microestructura de las piezas construidas en SML, vista lateral, perpendicular a la superficie de construcción [27].	23
Figura 1.3.2-2: Retos de la manufactura aditiva con aleaciones metálicas. A) Fractura por esfuerzos residuales, B) Delaminación, C) Esferas de metal, D) Pandeo y falta de adhesión a la placa de construcción. Imagen adaptada de Molitch [40].	25
Figura 1.4-1; Imágenes de polvo utilizado en MA producido por diferentes procesos: A) Atomización por gas, B) Atomización en equipo rotatorio, C) Proceso de electrodo rotatorio en plasma, D) Atomización en agua, E)Proceso mecánico de molienda. Imagen adaptada de Sames et al. [5], Poorganji et al. [44] y Sato et al. [45].	26
Figura 1.4.1-1: Representación de la distribución de tamaño de polvo para polvos unimodales y bimodales, así como la frecuencia acumulada para el polvo unimodal.	27
Figura 1.4.1-2: Representación del tamaño de polvo contenido en los percentiles 10, 50, 90 y 100.	28
Figura 1.4.3-1; Imágenes tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de subproductos de las construcciones; A) Polvo unido con el polvo adyacente por fusión parcial, B) Alteraciones en la rugosidad, C) Porosidad interna, D) Partículas de menor tamaño se adicionan a más	31

grandes por sinterizado, E) Manchas oscuras son productos de la oxidación superficial del material. Imagen adaptada de Ahmed et al [58], Nguyen et al [49], Geenen et al [33] y Gasper et al [17].

Figura 3-1: A) Evolución del promedio de envejecimiento a lo largo de los ciclos de manufactura. La línea verde indica el valor en el cual este porcentaje de envejecimiento deja de tener una variación mayor al 0.1% (Calculado para 50% de polvo virgen adicionado en cada iteración). B) Porcentaje de polvo presente de cada ciclo de manufactura previo al calculado (calculado para el ciclo 15 de manufactura). 36

Figura 3-2: Ventana de interacción con el programa "Average aging of the powder after reuse cycles". 38

Figura 3-3; La gráfica muestra el valor promedio de envejecimiento en el ciclo de estabilidad para construcciones donde se adiciona un porcentaje fijo de polvo virgen (Ejemplo 1). El ciclo de estabilidad se establece cuando el promedio de envejecimiento no varía más de 0.1%. 39

Figura 3-4: Se muestra gráficamente la cantidad de polvo que pertenece a cada ciclo de manufactura para el ciclo 15 tomando en cuenta un % de polvo virgen de: A) 15% y B) 70%. 40

Figura 3-5: Datos que se alimentaron al programa para obtener el promedio de envejecimiento del Ejemplo 2. 41

Figura 3-6: A) Promedio de envejecimiento para 50 construcciones con porcentaje de polvo virgen variable en cada nueva construcción. B) Porcentaje de polvo presente de cada ciclo de manufactura en el ciclo 15 de manufactura. 42

Figura 3.1-1 : Diagrama de flujo del procedimiento propuesto, en naranja se marca la entrada del polvo proveniente de fábrica, en rojo el proceso iterativo de reúso de polvo, en azul la toma de muestras y en verde la evaluación de muestras y sus resultados. 43

Figura 3.2-1: Arreglo de Tamices usado durante la experimentación. 43

Figura 4-1: Imagen del reductor de volumen de construcción para el equipo AM400 Renishaw tomada de las hojas de datos del equipo [68]. 46

Figura 4-2: A) Representación del acomodo de las 3 probetas de tensión sobre la placa de construcción sin los soportes. B) Dimensiones en milímetros de las probetas de tensión construidas con un espesor de 6 mm. 47

Figura 4-3: Probeta de tensión donde se muestran los soportes en color azul. A) vista lateral, B) vista inferior.	48
Figura 4-4: Probeta construida con una estructura de retícula.	49

## Índice de tablas

Tabla 1.3.1-1; Intervalo de los parámetros de construcción con aleaciones metálicas para algunas tecnologías de LPBF-MA [3,5,13,34,35].	22
Tabla 3-1: Considerando un 50% de polvo virgen adicionado en cada nueva construcción, se muestran los resultados de promedio de envejecimiento para cada ciclo de manufactura.	37
Tabla 4-1: Parámetros de construcción.	46
Tabla 4-2: Parámetros de los soportes tipo columna circular utilizados en las construcciones de las probetas de tensión	49

# Introducción

La Manufactura Aditiva (MA), en contraste con la manufactura sustractiva o conformacional, está basada en el principio de construcción mediante la deposición de material típicamente capa por capa. Este proceso de construcción ha llamado la atención en los últimos años pues tiene la capacidad de obtener piezas funcionales de geometría compleja, originalmente prototipos, en tiempos relativamente cortos, teniendo un ahorro de material y energía comparado con la manufactura sustractiva [1–4].

Una de las tecnologías de MA es la fusión láser en cama de polvo para aleaciones metálicas (**LPBF-MA** del inglés *Laser Powder Bed Fusion for Metallic Alloys*) la cual es conocida desde hace más de 20 años [3], y gracias a los avances en el área de los sistemas informáticos han potencializado sus capacidades, a pesar de esto, existen áreas de oportunidad en la tecnología LPBF-MA que llegan a repercutir directamente en el desempeño de la pieza manufacturada, por ello, es de gran importancia conocer los parámetros de construcción con los cuales se pueden obtener las propiedades mecánicas deseadas, evitando que estas sean modificadas por las capacidades inherentes de cada marca o modelo de máquinas y suplementos de MA [3,5].

Este documento, se divide en 4 apartados, los cuales incluyen: en el primero, una descripción del proceso de manufactura LPBF-MA, sus variables y áreas de oportunidad. En un segundo apartado se presenta el planteamiento del problema relacionado con el envejecimiento del polvo una vez expuesto a las condiciones de proceso; lo que permite, en un tercer capítulo realizar propuesta experimental para identificar la evolución del envejecimiento del polvo a lo largo de un número finito de ciclos de manufactura, conociendo únicamente una variable medible. Finalmente, se plantea un caso de estudio basado en la propuesta experimental que sirve de guía para una posterior ejecución de la propuesta y que expone información que es tomada en cuenta para las conclusiones del trabajo.

# 1. Antecedentes

## 1.1 Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva (MA) según la norma ISO 52900, se define como: 'término general para aquellas tecnologías que, basadas en una representación geométrica, crean objetos físicos mediante la adición sucesiva de material, a partir de un archivo digital' [6].

La misma norma menciona 7 procesos generales que por sus nombres en inglés son:

- 1) Binder Jetting (BJ)
- 2) Direct Energy Deposition (DED)
- 3) Material Extrusion (ME)
- 4) Material Jetting (MJ)
- 5) Powder Bed Fusion (PBF)
- 6) Sheet Lamination (SL)
- 7) Vat Photopolymerization (VF)

Cada uno de los procesos, pese a que tienen características para la deposición y adherencia del material diferentes entre sí, se encuentran dentro de la definición de manufactura aditiva antes mencionada.

Los procesos mencionados cubren una amplia gama de materiales por lo que la Manufactura Aditiva (MA) puede cubrir las propiedades mecánicas que se requieran en aplicaciones específicas.

El crecimiento de la MA se debe a diversos factores, entre ellos, la habilidad de crear geometrías complejas, con variedad de materiales, bajo desperdicio de materiales y rápida producción de pequeños volúmenes ya sea para prototipos o piezas finales [3,7].

La MA con aleaciones metálicas es diferenciada por el mecanismo bajo el cual es depositado el material capa a capa, así como la fuente de energía que consolida las capas en una pieza. Entre las tecnologías más comunes para metales se encuentran:

- 1) Fusión por láser o '*Laser Beam Melting*' (LBM)
- 2) Fusión por haz de electrones o '*Electron Beam Melting*' (EBM)
- 3) Sinterizado selectivo con láser o '*Selective Laser Sintering*' (SLS)

Así como tecnologías de deposición directa de material (DED del inglés *Direct Energy Deposition*) [8]. Estas tecnologías han tenido una buena aceptación en áreas de manufactura avanzada, ingeniería mecánica, ciencia de materiales, ingeniería espacial e ingeniería biomédica [7].

Este trabajo utiliza la tecnología de fusión láser en cama de polvo, la cual pertenece a los procesos de fusión en cama de polvo que se describen en la siguiente sección.

## **1.2 Fusión en cama de polvo (PBF del inglés *Powder Bed Fusion*)**

El proceso de PBF fue desarrollado en la Universidad de Texas (Austin, EE. UU.) en la década de los 80's [9] y es ampliamente empleado en diversas tecnologías. Este proceso fue concebido para generar prototipos en polímero, sin embargo, modificaciones en el mismo permiten el uso de materiales metálicos y cerámicos, por lo que tiene aplicación en diferentes áreas productivas [8].

Los componentes principales del proceso PBF son:

- Cama de polvo; Es el material proveniente del alimentador repartido sobre una superficie y donde capa a capa se irá depositando y añadiendo material hasta conformar la pieza manufacturada. La base, que sostiene todas las capas de polvo y es de metal sólido se le conoce como placa de construcción.
- Alimentador; Es un contenedor de polvo que cuenta con una superficie que irá subiendo conforme se necesite material en la cama de polvo.
- Fuente de energía; Cuenta con un sistema que dirige el haz hasta enfocarlo sobre la superficie del polvo, lo que permite suministrar la energía suficiente al polvo para que este se funda o sinterice.
- Raspador; Es un elemento paralelo al plano de construcción que arrastra el polvo desde el alimentador hacia la cama de polvo depositando una capa uniforme y llevando el excedente al contenedor.

El funcionamiento básico del proceso PBF consiste en depositar sobre la placa de construcción una fina capa del material en polvo para posteriormente hacer incidir la energía térmica necesaria para unir las partículas del material, después se procede a colocar una nueva capa de material sobre la ya existente, esto se logra desplazando la placa de construcción hacia abajo y depositando más material de los alimentadores sobre la cama de polvo, el material es distribuido con el uso de un raspador o rodillo que además de distribuir, en ocasiones compacta el polvo dejando una nueva capa fina de polvo de espesor conocido en la cual se hace incidir nuevamente el haz de energía que une las partículas de polvo de la nueva capa entre sí y con la capa precedente. Las etapas descritas anteriormente son cíclicas hasta que se concluye la construcción. Una representación del proceso 'powder bed fusión' se observa en la Figura 1.2-1.

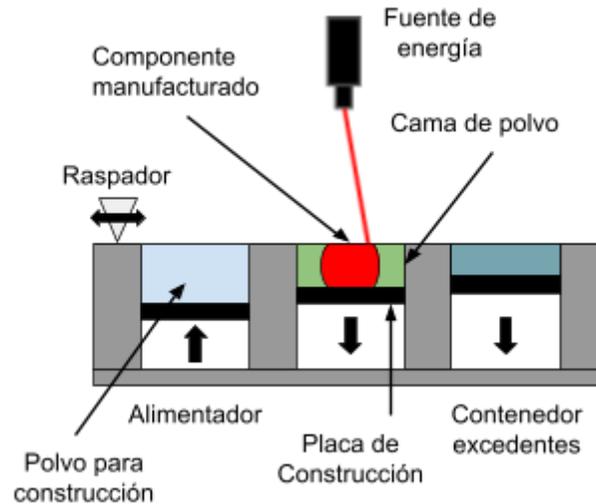


Figura 1.2-1: Esquema general del proceso de PBF.

Las fuentes de energía para PBF suelen ser un haz de electrones o una fuente láser; en el caso del haz de electrones, éste proporciona potencias más altas lo que permite una energía por unidad de volumen mayor logrando así utilizar espesores de capa mayores que una fuente de energía láser. El láser al generar menores potencias se utiliza en espesores de capa menor al del haz de electrones con el beneficio de una mayor resolución de la construcción y por lo tanto menor rugosidad, sin embargo, el haz de electrones al usar espesores de capa mayores, la velocidad de construcción es mayor [5,10].

### 1.3 Fusión láser en cama de polvo de materiales metálicos (LPBF-MA del inglés *Laser Powder Bed Fusion for Metallic Alloys*)

La fusión láser en cama de polvo es una tecnología del proceso PBF capaz de fabricar componentes de alta complejidad geométrica en una gran variedad de aleaciones base hierro (316L, 304L, H13, H20, 17-4PH), titanio (Ti6Al4V, Ti6Al7Nb, Ti24Nb4Zr8Sn), níquel (Inconel 625, Inconel 718, Nimonic 263), cobalto (CoCr), cobre (CuNi15), aluminio (AlSi10Mg, 6061, 6061. AlCu), magnesio, oro y algunos composites. El proceso LPBF-MA es usado cuando se habla del proceso PBF para

exclusivamente materiales metálicos. En esta tecnología, el polvo funde completamente con ayuda de un haz láser, generando capas densas sin la necesidad de post procesos, por lo que las construcciones finales igualan e incluso superan las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por otros procesos de manufactura [10–12].

Dicha tecnología empezó a comercializarse en el año de 1995 por EOS, marca de la cual hoy es propiedad la tecnología y que la ha compartido con otras empresas como SLM solutions, Concept Laser, Renishaw y 3D Systems [5].

Durante la construcción de piezas mediante la tecnología de LPBF-MA, existen diversos parámetros que afectan el desempeño mecánico del componente construido, algunos autores mencionan que existen alrededor de 130 parámetros [13] que pueden ser modificados. Los parámetros que más se han estudiado (Figura 1.3-1) son: la potencia del láser, la velocidad de escaneo, el diámetro del haz láser, el espesor de capa el material utilizado, el patrón de escaneo, la distancia entre los cada trazo del láser y la atmósfera de construcción, entre otras [14].

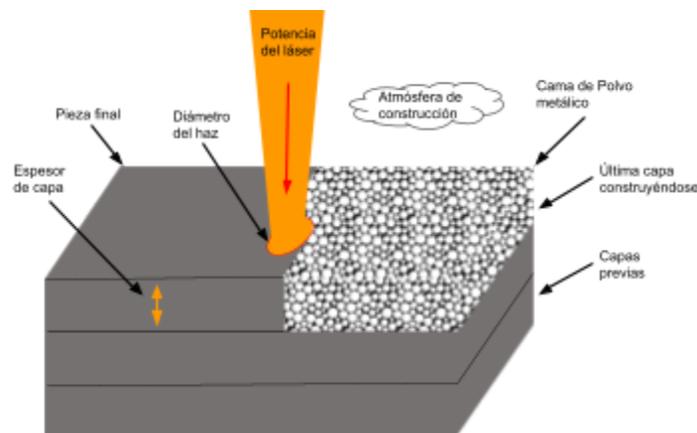


Figura 1.3-1: Representación general de algunos de los parámetros de construcción que modifican las propiedades mecánicas y velocidad de la pieza construida.

Como se mencionó al principio de este apartado, existe una gran variedad de aleaciones metálicas que pueden ser utilizadas con la tecnología LPBF-MA; existen algunas que presentan retos durante la manufactura, por ejemplo, el oro y aleaciones con una alta conductividad térmica y una alta reflectividad ya que son susceptibles a la fractura por estrés térmico, pues los gradientes de temperatura presentes durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento son muy altos, por ello el control de los parámetros de construcción, es esencial para procurar construcciones con las propiedades mecánicas homogéneas inherentes al material.

### **1.3.1 Parámetros de construcción**

#### Atmósfera

El proceso de LPBF-MA se lleva a cabo bajo condiciones de atmósfera controlada en oxígeno por lo que se utiliza vacío y/o un gas inerte, generalmente argón o nitrógeno, los cuales cumplen con la función de evitar interacciones físicas o químicas no deseadas con el material metálico en su estado líquido [5,15]. En algunos casos es preferible utilizar gas argón y/o vacío debido a que esta condición mantiene una mayor estabilidad química de la masa fundida [16], en comparación con el uso de nitrógeno, el cual propicia la generación de nitruros. Así también, la atmósfera puede ser precursora de las fases que van a solidificar, como se menciona en el artículo de Murr [15], donde el uso de nitrógeno mantiene las mismas fases que el polvo virgen, mientras que el argón, propicia la solidificación de fases diferentes a las del polvo virgen para un acero inoxidable 17-4 PH.

Para obtener una construcción libre de defectos provocados por la atmósfera, ésta se monitorea continuamente para que el contenido de oxígeno residual sea inferior al 0.1%, ya que en cantidades superiores propicia óxidos con los elementos aleantes del material u otros subproductos de reacciones químicas que afectan la composición de la aleación lo que modifica las propiedades mecánicas del objeto construido. En algunos equipos se utiliza un flujo laminar de gas inerte sobre la

cama de construcción lo que ayuda a retirar productos secundarios del proceso, tales como humos y las salpicaduras de metal [3,17].

### Potencia del láser

La energía suministrada por la fuente láser genera, a micro escala, un mecanismo de calentamiento debido a su interacción con la materia, haciendo vibrar los átomos [18] y elevando la temperatura hasta fusionar el polvo metálico y la capa precedente de material, que tras su enfriamiento permite la unión y consolidación en una sola masa metálica al disipar la energía térmica por los mecanismos conocidos (conducción, convección y radiación) [19]. La potencia tiene intervalos que varían en cada equipo, sin embargo, la mayoría de estos trabaja entre los 50 y los 1000 watts [5,20-22]. Cuando el láser impacta la superficie de construcción genera una región de interacción que de manera ideal se describe de forma circular sobre la superficie, y cilíndrica hacia el interior, sin embargo, esto no es así, un ejemplo de la geometría del haz incidente se presenta en la Figura 1.3.1-1 donde se muestra la comparación entre dos de láseres: CO<sub>2</sub> y Nd-YAG (acrónimo en inglés neodymium-doped yttrium aluminium garnet; granate de itrio y aluminio dopado con impurezas de neodimio en español) [14].

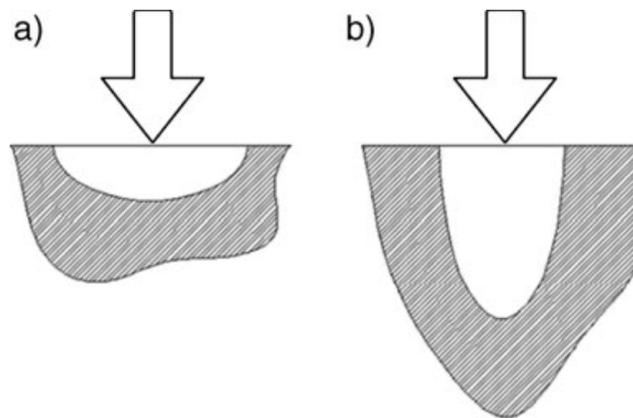


Figura 1.3.1-1: Descripción esquemática de la distribución de temperatura de un láser de CO<sub>2</sub> (a) y un láser de Nd-YAG (b) [14].

Lo anterior supone que la forma del haz hacia el interior se puede representar mediante un modelo de atenuación Gaussiano, lo que confiere pérdidas de energía en los laterales del haz que pueden ser mitigados ajustando la distancia entre los centros de los trazos del haz [23].

#### Velocidad de escaneo

El haz láser se desplaza sobre la cama de polvo con una velocidad conocida como velocidad de escaneo, este parámetro interviene en la cantidad de energía que va a recibir el material bajo el haz, y su importancia radica en asegurar que el haz permanezca el tiempo suficiente para que el polvo metálico, al calentarse, genera cordones completamente densos, puesto que cuando la relación entre la potencia suministrada y la velocidad no están seleccionada adecuadamente, el material no recibe suficiente energía o se calienta de manera no homogénea, lo que forma *lack of fusion* (cordones inconclusos) y *balling* (esferas metálicas) defectos que afectan la disposición de las capas subsecuentes, además de inducir porosidades en la pieza construida. Las velocidades más comunes se encuentran entre los 50 y los 1500 mm/s [21,24–26] siendo la cota mayor la que causa una mayor cantidad de inconvenientes durante las construcciones, pese a incrementar la productividad.

#### Espesor de capa

Para aumentar la productividad de la manufactura aditiva se requiere de construcciones realizadas en el menor tiempo, en ese sentido, para modular el tiempo de construcción se puede modificar el espesor de las capas y la velocidad de escaneo, ya que una pieza con un número menor de capas se puede fabricar en un menor tiempo que una pieza con un número superior, no obstante, la calidad superficial entendida como rugosidad (Ra) aumenta conforme aumenta el espesor de las capas y se afecta también la característica geométrica mínima factible de construir. Por ello se debe encontrar un punto de equilibrio entre el acabado superficial y el espesor de capa que permitan cumplir con las especificaciones de la construcción [14,27–29].

### Patrón de escaneo

Durante las construcciones, el láser tiene la posibilidad de seguir diversas trayectorias para cubrir el área a fusionar en cada capa, estas trayectorias reciben el nombre de patrón de escaneo o de construcción, los cuales se definen como: la trayectoria que sigue la fuente de energía, en este caso un haz láser durante la construcción. Varios patrones de escaneo son reportados en la literatura, algunos de ellos se muestran en la Figura 1.3.1-2. Para LPBF-MA el escaneo por islas (Figura 1.3.1-2 F) se utiliza para reducir los esfuerzos residuales provocados por la solidificación direccional. Este patrón asemeja un tablero de ajedrez con patrón de rellenos unidireccionales alternos, lo que favorece una mejor distribución de los gradientes de temperatura en el plano de escaneo (plano x-y) [5,30], así también, el patrón mostrado en la Figura 1.3.1-2 C se sugiere utilizar para altas potencias de láser ya que permite disipar el calor que se ha suministrado al material. En el caso de los contornos se utiliza un patrón lineal siguiendo el perímetro de la geometría para generar una mejor calidad superficial [5]. Para construcciones de piezas reticuladas o de espesor pequeño, la estrategia de hélice propicia la solidificación direccional de la pieza metálica delgada disminuyendo su porosidad (Figura 1.3.1-2 D) [31]. Se puede encontrar en el trabajo de Wan, [36] que el uso de un escaneo unidireccional (Figura 1.3.1-2 A) genera un ángulo de crecimiento de las dendritas columnares de  $60^\circ$ , mientras que haciendo uso de escaneo bidireccional (Figura 1.3.1-2 B), el crecimiento de dichas dendritas es en un ángulo de  $45^\circ$  lo que favorece las propiedades mecánicas de la pieza construida .

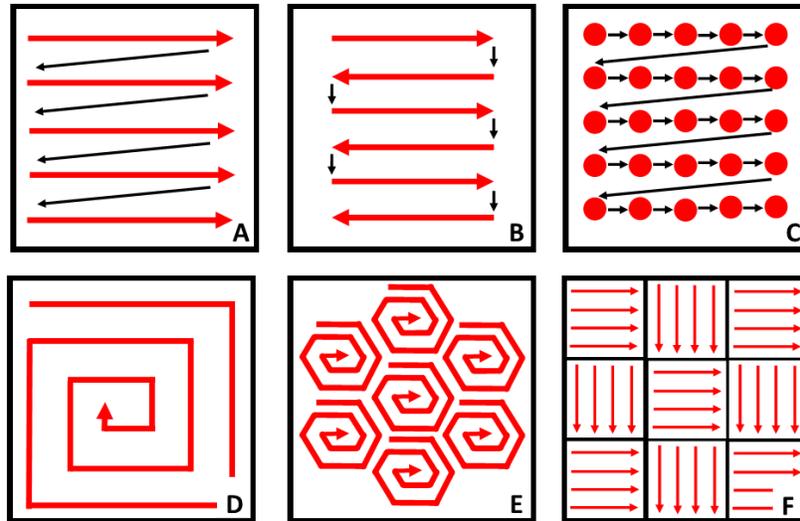


Figura 1.3.1-2: Patrones de escaneo del haz láser sobre el polvo metálico en el plano XY (ortogonal a la dirección de construcción): a) unidireccional o concurrente, b) bidireccional, serpenteante o contracorriente, c) puntos de fusión (para haz pulsante), d) hélice, e) hélice hexagonal, puntos de contorno o relleno de serpiente y f) islas o tablero de ajedrez.

#### Cama de construcción

La cama de construcción es donde se contiene el polvo proveniente de los alimentadores y donde se realiza la fusión del material. La parte más inferior donde descansa todo el polvo es una placa metálica conocida como placa base o placa de construcción y es una variable que repercute de manera importante ya que tiene efecto en la disipación de la energía térmica suministrada por el láser y de ella depende la adhesión de las primeras capas, por lo que se debe tener una adecuada rugosidad y también un espesor adecuado para soportar los esfuerzos térmicos y residuales de la manufactura [32]. Hablando de los esfuerzos térmicos, se ha reportado que al precalentar la placa de construcción se reduce significativamente el gradiente térmico, previniendo la distorsión y fractura de las piezas que se encuentran más próximas a la placa base debido a la disminución de los esfuerzos residuales que se presentan durante la solidificación, este precalentamiento no afecta significativamente la microestructura final de la pieza construida [33].

## Energía

Para cuantificar la cantidad de energía suministrada por el proceso LPBF-MA se han hecho uso de las variables más comunes como espesor de capa y velocidad de escaneo. Entre las relaciones más comunes para cuantificar la energía se encuentran la que describe la densidad de energía, la cual ha sido utilizada por diferentes autores, un ejemplo de esta es la Ecuación 1

$$E_v = \frac{P_L}{v_s H_s D_s} \quad (1)$$

donde  $E_v$  es la energía por unidad de volumen, que depende de la potencia del láser ( $P_L$ ) dividida entre la velocidad de escaneo ( $v_s$ ), la distancia entre líneas de escaneo ( $H_s$ ) y el espesor de la capa ( $D_s$ ) [12]. Otra forma de calcular la energía es la expresión que se muestra en la Ecuación 2, donde  $TE$  es el tiempo de exposición y  $P_d$  la distancia entre los puntos (esta ecuación es aplicable en el caso de un haz láser pulsado). Algunos valores típicos de estos parámetros se muestran en la Tabla 1.3.1-1, donde cabe destacar que estas mismas relaciones se han utilizado para otras tecnologías en la que los parámetros de construcción son similares pero sin obtener datos concluyentes comparando entre sí mismas y respecto a otras.

$$E_v = \frac{P_L TE}{P_d H_s D_s} \quad (2)$$

Si no se cuenta con el tiempo de exposición o la distancia entre las líneas de escaneo, se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$E_v = \frac{P_L}{v_s D_s \delta} \quad (3)$$

Que relaciona los parámetros de potencia con el volumen en el que se hace incidir la energía, y donde  $\delta$  es el diámetro del haz.

Tabla 1.3.1-1; Intervalo de los parámetros de construcción con aleaciones metálicas para algunas tecnologías de LPBF-MA [3,5,13,34,35].

Tecnología	Espesor de Capa [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de Energía [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]	Tamaño del haz [ $\mu\text{m}$ ]	Diámetro del polvo [ $\mu\text{m}$ ]	Temperatura de la cámara [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Laser Beam Melting	20-50	<242			0-500
Laser Melting Deposition	40-1000	90-220		20-200	0-200
Selective Laser Melting	10-50	30-150	75-100	10-45	200-500

Los procesos LPBF-MA implican la fusión completa del material, por lo tanto existen velocidades de enfriamiento que conllevan gradientes térmicos cíclicos, reportados con valores de  $10^6$ - $10^8$  K/s [24]. Por ello la estrategia de escaneo es de gran importancia para determinar cómo se realizará el proceso de transferencia de calor durante la solidificación, lo cual tiene una relación directa con la porosidad y la morfología microestructural de las construcciones [5,10].

### 1.3.2 Áreas de oportunidad en la tecnología LPBF-MA

Durante la construcción de piezas mediante manufactura aditiva con la tecnología LPBF-MA, se pueden producir una serie de diversas características que pueden afectar el desempeño de las construcciones como: huecos o porosidades, agrietamiento por esfuerzos residuales y delaminación, entre otros [5,20], estas características son área de mejora en las tecnologías de manufactura aditiva.

Los poros son los defectos más comunes que se presentan en las tecnologías de MA para metales [5,18]. En LPBF-MA esto se produce por diversos factores durante la fusión y solidificación del polvo metálico. Los poros se pueden clasificar en tres tipos (Figura 1.3.2-1) que relacionan su origen con su morfología. Los tipo I, son aquellos que se producen por atrapamiento de gas, ya sea por capas no densas de

polvo gas atrapado en las partículas de polvo previo al proceso de LPBF-MA (Figura 1.4.3-1 C), liberación de hidrógeno al momento de la solidificación de la masa metálica [37] o por la evaporación del metal. Los poros Tipo I son identificables por presentarse como esferas con un factor de esfericidad mayor a 0.9, siendo 1 el valor dado para una partícula completamente esférica. Los poros tipo II, son aquellos que se presentan con una forma irregular y están relacionados con problemas como: fusión incompleta, microrechupes, estrés residual, delaminación, entre otros (Figura 1.3.2-1). Por otro lado los tipo III son fácilmente distinguibles por presentarse de forma alargada y casi siempre paralelos a la placa de construcción, mostrando esfericidades menores al 0.3 y se forman principalmente por falta de adhesión entre las capas [20,27,38,39].

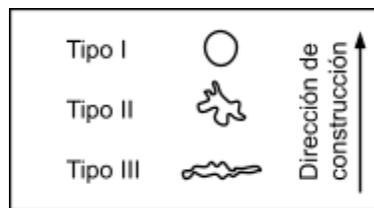


Figura 1.3.2-1. Morfología de los poros observado en la microestructura de las piezas construidas en LPBF-MA, vista lateral, perpendicular a la superficie de construcción (basado en [27]).

Los poros macro y microscópicos son peligrosos para el desempeño de la pieza pues reducen la densidad de la pieza y en el caso de los poros tipo II y III su geometría irregular los hace predilectos para la acumulación de esfuerzos, propiciando fallas como la fractura por fatiga [40,41].

Para disminuir la porosidad, se pueden modificar los parámetros de construcción, generalmente aumentado el tiempo de exposición del láser o modificando patrones de escaneo, a modo de permitir que las masa metálica líquida se mantenga el tiempo suficiente hasta que los gases atrapados escapen a la superficie o la masa se enfríe de tal manera que se eviten los esfuerzos residuales con lo cual se consigue

disminuir la porosidad [5,20,42], dejando las construcciones con densidades superiores al 99% [43].

Los poros no son los únicos problemas de la manufactura aditiva, como se puede observar en la Figura 1.3.2-2 existen otro tipo de problemas que se pueden observar de manera macroscópica y en su mayoría están asociados a la disipación de calor durante la solidificación de la pieza metálica. Los defectos que más destacan, son los que se presentan, durante la solidificación la masa metálica, cuando pasa de un volumen líquido a un menor volumen en sólido ocasionando esfuerzos de tensión residuales que al acumularse general el pandeo de las piezas (Figura 1.3.2-2 D) o la fractura de estas (Figura 1.3.2-2 A).

En el caso de que la energía suministrada sea muy baja, o la disipación de calor muy alta, las capas nuevas de material no se unen con firmeza a las capas precedentes, lo que genera una delaminación, fracturando la pieza en regiones paralelas a la cama de construcción (Figura 1.3.2-2 B); en sentido contrario, cuando la energía suministrada es muy alta, se producen esferas metálicas, '*balling*' en inglés (Figura 1.3.2-2 C), que afectan la rugosidad de la pieza e impiden el correcto depósito de la siguiente capa de polvo, lo que se vuelve un efecto avalancha de defectos en la región donde se presentó este fenómeno de esferas propiciando una construcción defectuosa.

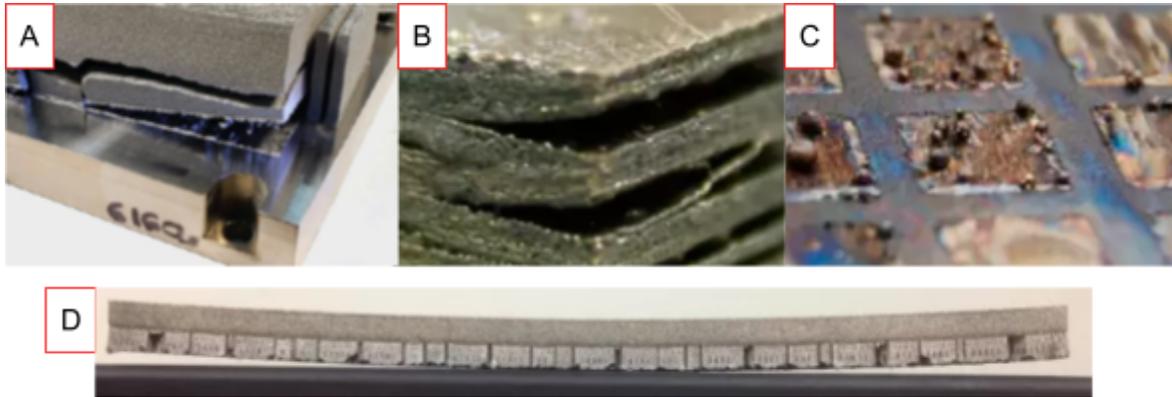


Figura 1.3.2-2: Retos de la manufactura aditiva con aleaciones metálicas. A) Fractura por esfuerzos residuales, B) Delaminación, C) Esferas de metal, D) Pandeo y falta de adhesión a la placa de construcción. Imagen adaptada de Molitch [40].

## 1.4 El polvo para el proceso LPBF-MA

En las construcciones mediante LPBF-MA es necesario el uso de polvo de aleación con la composición química que requiere la construcción, razón por la cual las aleaciones metálicas deben tener características que favorezcan su uso, como por ejemplo: alta absorbanza al espectro del láser, generación de capas densas de polvo, baja porosidad de las partículas de polvo y baja dispersión del haz pues en caso contrario, las partículas de polvo se calienten de forma no homogénea lo que ocasiona que la fusión no sea uniforme [22,44].

Los polvos metálicos se producen por diferentes procesos algunos son: mecánicos, químicos y por atomización, de estos, el proceso por el que se produce la mayoría del polvo para MA es por la vía de la atomización, la cual se divide en subprocesos: atomización en gas, en agua o por plasma [5,44–47]. Estos procesos confieren a los polvos metálicos diferentes características, entre las que se encuentran: la esfericidad de la partícula de polvo, la distribución del tamaño de las partículas, composición química, microestructura, porosidad interna, densidad de compactación y fluidez, entre otras variables. En la figura 1.4-1 se muestran imágenes de las características morfológicas que confiere cada proceso de manufactura a los polvos.

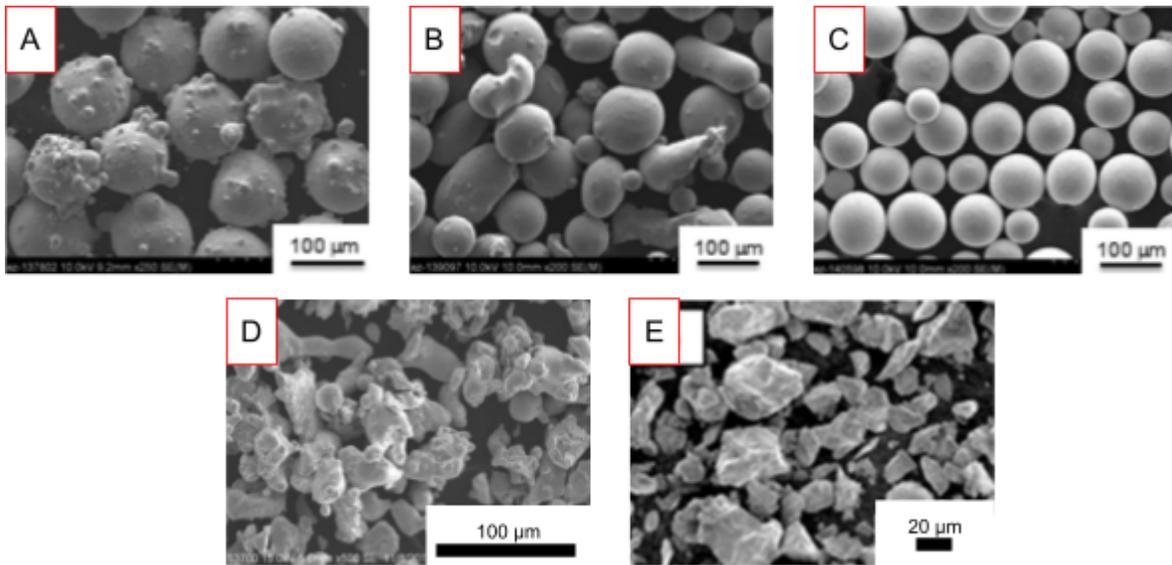


Figura 1.4-1; Imágenes de polvo utilizado en MA producido por diferentes procesos: A) Atomización por gas, B) Atomización en equipo rotatorio, C) Proceso de electrodo rotatorio en plasma, D) Atomización en agua, E) Proceso mecánico de molienda. Imagen adaptada de Sames et al. [5], Poorganji et al. [44] y Sato et al. [45].

Para obtener construcciones de alta densidad, el polvo debe ser depositado de manera compacta sobre la cama de construcción, esto minimiza las porosidades en la pieza final y favorece la distribución homogénea del calor suministrado por el láser; para lograr esto se ha analizado el factor de forma y la distribución del polvo como responsables de la densidad de compactación del polvo [48].

### 1.4.1 Distribución de tamaño de polvo

La distribución de tamaño de polvo (PSD de las siglas en inglés *Powder Size Distribution*), hace referencia a la curva de distribución del diámetro de las partículas de una muestra de polvo, donde casi comúnmente el tamaño de estas partículas de polvo para procesos LPBF-MA, se encuentra entre los 15 $\mu$ m y los 45 $\mu$ m [49], con una sola moda, sin embargo, también existen casos de proveedores de polvo que venden material en los intervalos antes mencionados pero mezclando dos o más polvos con una moda diferente a los cuales se les llama: bimodales

(Figura 1.4.1-1) [50]. Esta mezcla de dos polvos se hace con el fin de generar capas de mayor compactación de polvo donde los polvos finos puedan llenar los poros dejados por partículas de polvo más grandes, lo que resulta en construcciones más densas y con mejor acabado superficial, sin embargo, una distribución amplia del polvo puede también sustituir estas mezclas de polvo. Por otro lado un PSD más cerrado en el tamaño de las partículas, contribuyen a piezas con mejor elongación acorde a los resultados reportados por Herzog [3].

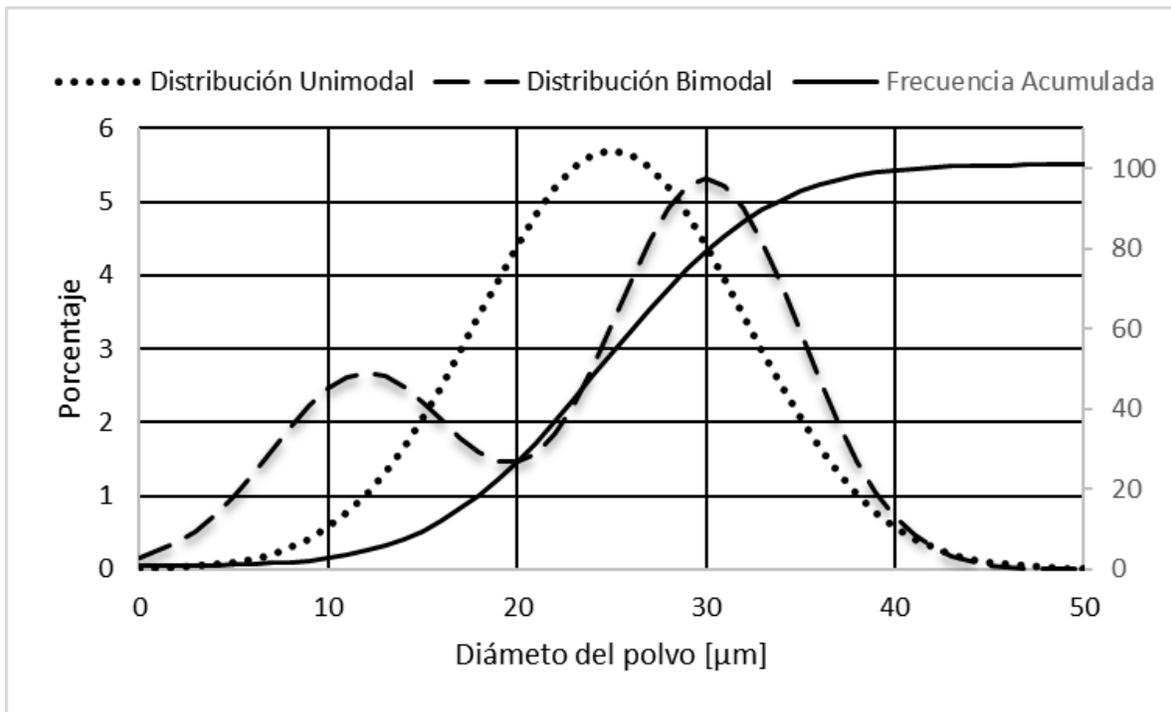


Figura 1.4.1-1: Representación de la distribución de tamaño de polvo para polvos unimodales y bimodales, así como la frecuencia acumulada para el polvo unimodal.

Como medida acumulativa de la amplitud del PSD y la media de la distribución, se utilizan los parámetros D10, D50 y D90 los cuales hacen referencia al tamaño de polvo que contiene el 10%, 50% y 90% de las partículas de polvo, respectivamente; como ejemplo en la Figura 1.4.1-2 se puede observar que las partículas de 0 a 15.5  $\mu\text{m}$  conforman el 10% de la cola izquierda de la distribución acumulada, de la

misma forma de 0 a 25  $\mu\text{m}$  está contenido el 50% de la PSD. Siendo el D50 la media del polvo.

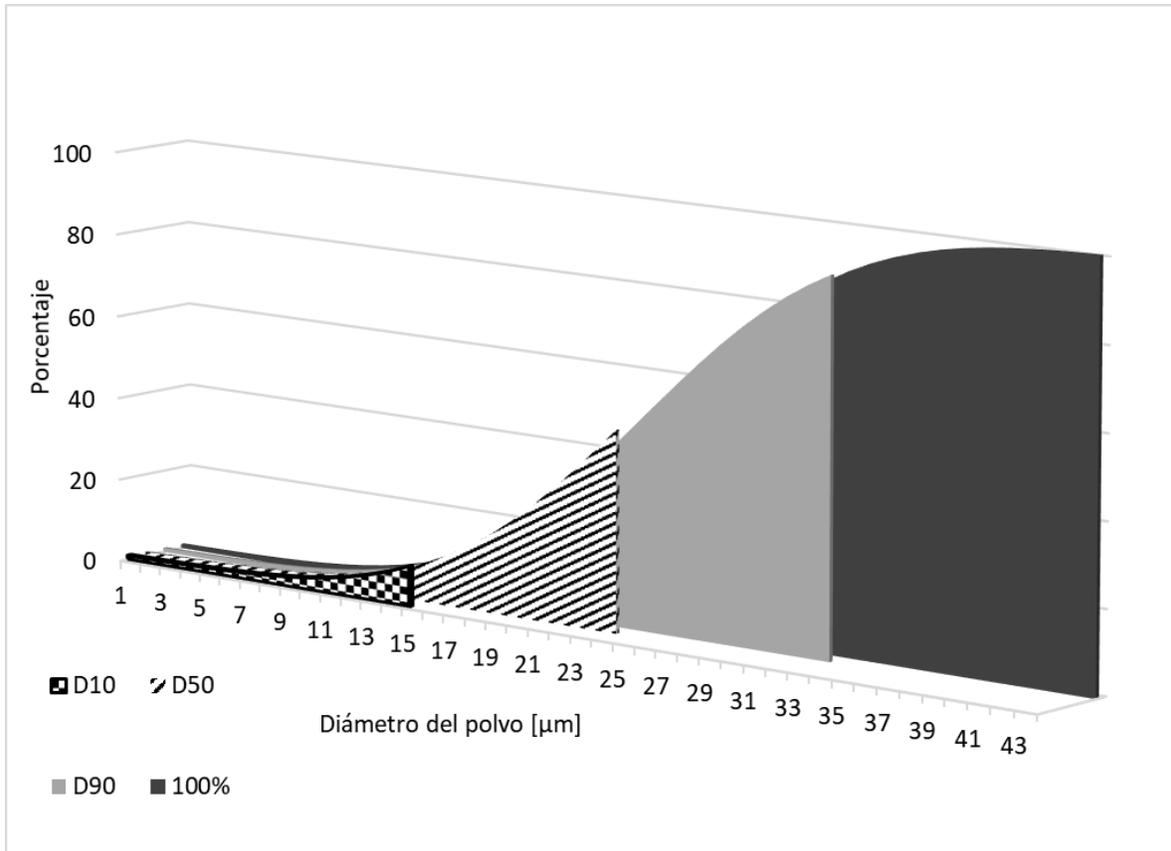


Figura 1.4.1-2: Representación del tamaño de polvo contenido en los percentiles 10, 50, 90 y 100.

El PSD es una condición que modifica la compactación del polvo, afectando los fenómenos térmicos de calentamiento y enfriamiento que se suscitan durante el derretimiento selectivo del material y, al no ser homogéneos estos fenómenos, se terminan generando distorsiones geométricas en las piezas, así como modificaciones en la microestructura, las propiedades y consecuentemente el comportamiento final de la construcción [51]. En este sentido Spierings et al. [34] proponen un criterio de selección del espesor de tamaño de capa en el cual el espesor de capa debe de ser al menos 50% mayor que el D90 del polvo y un PSD

amplio que contribuya como se mencionó con anteriormente a generar capas densas de material que reduzcan los defectos en las construcciones.

Al inicio de una construcción, los factores que pueden modificar el PSD en su estado virgen (primer uso) son: el proceso de producción y el almacenamiento, sin embargo, el material depositado en la cama de construcción que no es utilizado por completo, que puede ser recuperado para siguientes construcciones, ha sido estudiado debido a la posible degradación por la exposición a la atmósfera y a los ciclos térmicos que generan partículas sinterizadas más grandes al polvo original, así como la acumulación de óxidos, por ello, actualmente se identifican áreas de oportunidad en el estudio del envejecimiento del polvo y si este envejecimiento genera o no modificaciones significativas en propiedades mecánicas de las construcciones cuando la calidad del polvo se modifica.

#### 1.4.2 Factor de forma del polvo

El factor de forma del polvo (**PSF** del inglés *Powder Shape Factor*), es una propiedad del polvo que determina qué tan cercano a la geometría de una esfera está una partícula de polvo y puede ser obtenido por diversas técnicas, una de ellas es: Partiendo de una imagen en dos dimensiones, las esferas del polvo se observan como circunferencias en el plano, en ese sentido, la esfericidad hará referencia a la similitud entre la geometría observada y un círculo, por ello en la Ecuación 4, se compara el área observada con el área calculada a partir del perímetro de la geometría observada, cuando ambas áreas son iguales, la relación de circularidad es 1 mientras que geometrías que no cumplan con esto tendrán un valor menor a 1 [52,53].

$$Circularidad = 4\pi \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (4)$$

También aceptada, se encuentra la relación de aspecto (**AR** del inglés *Aspect Ratio*) en la que la imagen 2D de una partícula de polvo es englobada dentro de una

elipse, la cual cuenta con un eje mayor y un eje menor, valores que se dividen como se muestra en la Ecuación 5,

$$AR = \frac{Eje Mayor}{Eje Menor} \quad (5)$$

siendo el caso de cuando los ejes mayor y menor son del mismo tamaño, el AR tiene un valor de uno y hace referencia a una geometría completamente circular, y cuando el valor es más alejado a uno, la geometría observada es más elíptica [53].

En el proceso LPBF-MA, el polvo es arrastrado desde el alimentador hasta la cama de construcción con el uso de un elemento para distribuir el polvo, paralela y uniformemente a la placa de construcción, que puede considerarse como un raspador (en inglés *blade*), el cual deposita por un efecto avalancha la nueva capa de polvo sobre la cama de construcción. Por este motivo, una característica que se debe considerar para definir la calidad de un polvo, es la fluidez del mismo, la cual se define como la resistencia que ofrece el polvo a fluir y se mide en términos de energía [54]. La fluidez es la principal variable que se ve afectada por el factor de forma (PSF) del polvo, pues partículas completamente esféricas se mueven con facilidad a comparación de partículas irregulares, pues estas últimas friccionan entre sí y se pueden trabar mecánicamente impidiendo el desplazamiento libre de las partículas.

### 1.4.3 El reuso del polvo

El reuso del polvo, es una actividad recurrente en la MA por LPBF-MA, ya que, el polvo, al no ser consumido en su totalidad durante la construcción, el polvo excedente puede ser reutilizado, lo que disminuye el costo de las manufacturas al no tener que desechar polvo que no es fundido en la pieza sólida final. [45,54]. Este polvo que no es fusionado a la pieza final, ha sido estudiado para determinar su reusabilidad y se ha reportado que sus características físicas de PSD y PSF se modifican [49,55], por ello, se recomienda usar lo menos posible el material de construcciones previas. Una recomendación que se hace en el caso de materiales

poliméricos reportado por Nandwana, menciona que para un proceso de cama de polvo, no se debe hacer uso de más del 67% de polvo no virgen en una construcción [56], con esto se evita que los cambios en las características del polvo al ser expuesto a una construcción previa lleguen a modificar las propiedades de la pieza construida.

Se ha reportado también, que la exposición del polvo a las construcciones modifica el PSD, este suele hacerse más amplio, lo que aumenta la compactación de las capas comparando con un polvo virgen de PSD cerrada [57] a pesar de esto, se generan subproductos de la tecnología como son: las partículas sinterizadas, las chispas [57] y la formación de óxidos (Figura 1.4.3-1) que son modificadores del factor de forma que afecta la fluidez del material [17] reduciendo la capacidad de compactación.

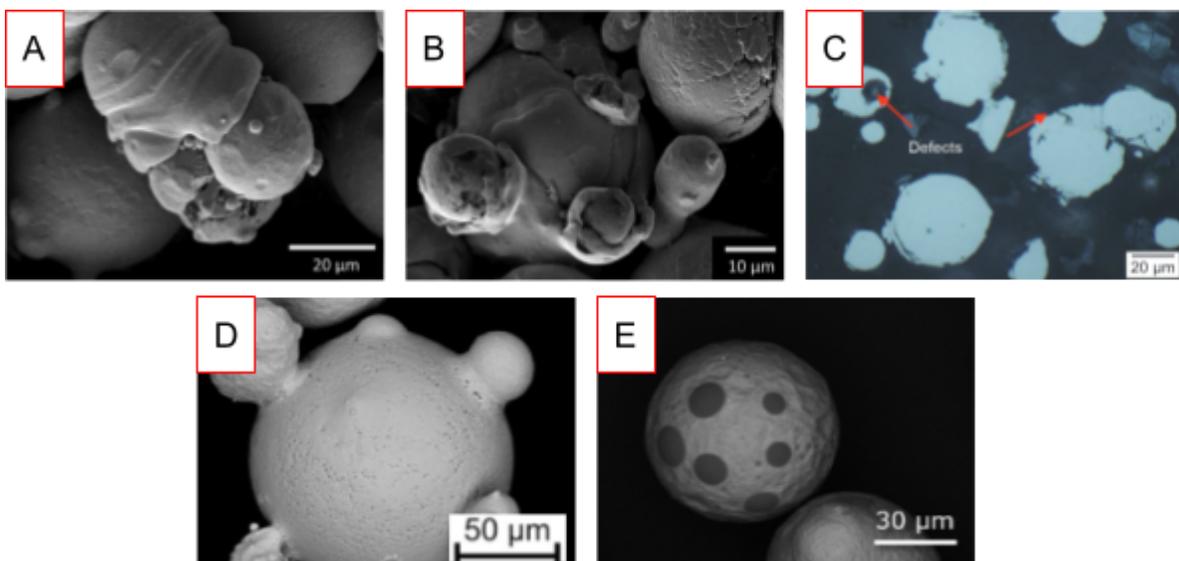


Figura 1.4.3-1; Imágenes tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de subproductos de las construcciones; A) Polvo unido con el polvo adyacente por fusión parcial, B) Alteraciones en la rugosidad, C) Porosidad interna, D) Partículas de menor tamaño se adicionan a más grandes por sinterizado, E) Manchas oscuras son productos de la oxidación superficial del material. Imagen adaptada de Ahmed et al [58], Nguyen et al [49], Geenen et al [33] y Gasper et al [17].

Durante las construcciones se utiliza un excedente de polvo para cubrir la placa de construcción con material suficiente para que se construya la nueva capa de la pieza: este excedente es contenido en un recipiente al final del recorrido del raspador (Figura 1.2-1) y es vuelto a utilizar en la siguiente construcción junto con el polvo que no se utilizó de la cama de construcción, ambos polvos son mezclados y posteriormente tamizados lo que retira cualquier partícula mayor al tamaño del polvo con el que se estaba trabajando que se pudieron generar en el proceso LPBF-MA. Dependiendo del tipo de polvo utilizado, se usan mallas entre los 40 y los 150  $\mu\text{m}$  [17,57,59,60] este tamizaje, genera una condición bajo la cual se puede mantener un tamaño de polvo menor a la malla seleccionada, en el caso de que se prevea reutilizar la aleación un número indefinido de veces.

Para conocer el comportamiento de las propiedades físicas del polvo después de una serie de construcciones en las que se reutiliza el polvo, se han realizado experimentos, como el reportado por Ahmed et al. [58] el cual señala una disminución en la fluidez del material y un ensanchamiento de la campana de distribución del PSD que también es confirmado por Ardila et al. [61], y Meier et al. [55], este último también menciona que al retirar las partículas más grandes de polvo mediante tamizado, se puede lograr mantener similitud entre la PSD del polvo virgen y la del polvo reutilizado (evaluado a 12 ciclos de reuso). También Ahmed et al. [58] evalúan propiedades mecánicas del polvo reutilizado reporta que no existe evidencia de cambio en las curvas de tensión ingenieril (evaluando 10 ciclos de uso) a pesar de que él sí reporta cambios en PSD y PSF. Por otra parte en documentos de Nandwana et al. [56] y Nguyen et al. [49] reportan ausencia de cambios significativos en las propiedades físicas del polvo así como en el comportamiento mecánico de las piezas manufacturadas.

Aparte de la evaluación de las propiedades físicas del polvo a lo largo de un número finito de reuso, autores como Alamos y Gorji [62,63] evaluaron las

propiedades químicas del mismo concluyendo que esta propiedad no se ve afectada en 10 ciclos de manufactura.

## 2. Planteamiento del problema

Con base en los estudios realizados por diversos autores [27,34,54,56,58], no se identifica convergencia en los resultados relacionados con el impacto del envejecimiento del polvo en propiedades físicas tras múltiples ciclos de manufactura, los cuales evalúan hasta 14 ciclos. Químicamente hablando, el polvo se mantiene estable después de 10 ciclos de manufactura [63]. Dado lo anterior, y la importancia del polvo en el costo de producción con la tecnología LPBF-MA [45,54], se identifica la necesidad de una estrategia para estimar la edad del polvo, y con ello identificar la afectación del envejecimiento en el cambio de las propiedades físicas del polvo así como la repercusión de estos cambios en las propiedades mecánicas de las piezas construidas.

### 2.1 Objetivo

Proponer una estrategia experimental, para el estudio del envejecimiento del polvo en la tecnología LPBF-MA, considerando el porcentaje de polvo solidificado y el virgen agregado en cada iteración de manufactura.

### 2.2 Alcances

- Revisar información sobre los temas relacionados al proyecto
- Generar una propuesta experimental que tome como métrica el porcentaje de polvo agregado tras cada nuevo ciclo de manufactura para determinar el promedio de envejecimiento del polvo en cada ciclo y cómo este afecta a las siguientes propiedades:
  - Factor de forma del polvo (PSF).
  - Distribución de tamaño de polvo (PSD).

y analizando si hay repercusión en las piezas construidas evaluando:

- Probetas de tensión.
- Probetas de bajo porcentaje de consumo de material.

### 3. Propuesta para determinar el envejecimiento del polvo

Esta propuesta surge de la necesidad de conocer el proceso de envejecimiento o reuso de una cantidad de polvo para estimar la afectación al seguir utilizándose en construcciones.

Después de cada construcción, se tiene polvo en tres contenedores; la cama de construcción, el alimentador y el contenedor de excedentes (Figura 1.2-1). El polvo de los tres contenedores es recuperado y mezclado homogéneamente, posterior a esto, se adiciona polvo virgen para compensar el perdido por la construcción, esto pasa en cada nueva construcción, por tal motivo se adiciona polvo virgen que se mezcla con los polvos de la construcción anterior, esta adición reduce el envejecimiento del mismo en una cierta cantidad. Para definir esta cantidad, se propone calcular un parámetro de envejecimiento llamado **promedio de envejecimiento** a través del registro de los porcentajes de polvo virgen que se adicionan en cada nueva construcción.

Para determinar el promedio de envejecimiento, se considera que la cantidad del polvo virgen que se adiciona en cada iteración, es constante y las condiciones no cambian mientras se está realizando la misma construcción, esto permite generar una gráfica como la que se muestra en la Figura 3-1A, donde se observa la tendencia que sigue el promedio de envejecimiento al pasar de los ciclos de

manufactura. Los cálculos realizados para generar el gráfico, se describen en el Ejemplo 1.

### **Solidificación y descarte del polvo constante (Ejemplo 1, 50% de polvo disponible).**

Al iniciar una serie de construcciones, la primera de estas se inicia con 100% de polvo virgen, lo que quiere decir que el polvo tiene un valor 0 de promedio de envejecimiento y por lo tanto es posible marcar este primer punto en la gráfica de la Figura 3-1A (Ciclo o manufactura 1, Promedio de envejecimiento 0).

Posterior a la primera construcción, la cantidad de polvo recuperado suma una masa, a la cual se le deberá agregar polvo virgen para reponer el polvo consumido (pieza construida y polvo descartado por tamizado). Para fines de este primer Ejemplo de estudio, se considera que se ocupa (consume) el 50% del polvo entre pieza construída y tamizado, por ello, para realizar la segunda construcción, se tiene que adicionar un 50% de polvo virgen al total de la masa requerida para la siguiente construcción (este polvo virgen ya se tamizó para retirar polvo con tamaños de partícula no deseados). Con base en lo mencionado, 50% del polvo tiene un promedio de envejecimiento de 1 ciclo de manufactura y 50% tiene cero de promedio de envejecimiento (polvo nuevo o virgen), por tal motivo, al hacer un promedio ponderado de estos dos valores, da como resultado que el polvo tiene en promedio 0.5 ciclos de construcción (segundo punto en la gráfica (2,0.5), Figura 3-1A).

Siguiendo las condiciones descritas en el párrafo anterior, en la tercera construcción se añade nuevamente un 50% de polvo virgen y el resto está compuesto por un 25% de polvo con 2 ciclos de exposición al proceso de manufactura y 25% de polvo con 1 ciclo de exposición. Al obtener el promedio

ponderado de estos 3 polvos, resulta en 0.75 ciclos de promedio de envejecimiento (tercer punto en la gráfica Figura 3-1A).

Al continuar considerando un 50% de polvo virgen añadido en cada nueva construcción se genera una lista de datos como los que se muestran en la Tabla 3-1. donde se observa que el promedio comienza a oscilar cercano a un mismo valor conforme aumentamos el número de ciclos, gráficamente en la Figura 3-1A se observa una asíntota.

Una forma de visualizar cuánto polvo de otras manufacturas está presente en un ciclo en específico es generando una gráfica de barras como la que se muestra en la Figura 3-1B, donde se observa qué porcentaje del total del polvo aporta cada ciclo, es decir, en la Figura 3-1B realizada para el ciclo 15, se agregó un 50% de polvo virgen, por tal motivo, el polvo del ciclo 15 está compuesto por un 50% de polvo con cero ciclos de manufactura y un 25% del total, por polvo con un ciclo de manufactura, de esta manera es notable que el polvo con un envejecimiento mayor a 5 ciclos ya no aporta un porcentaje significativo del total.

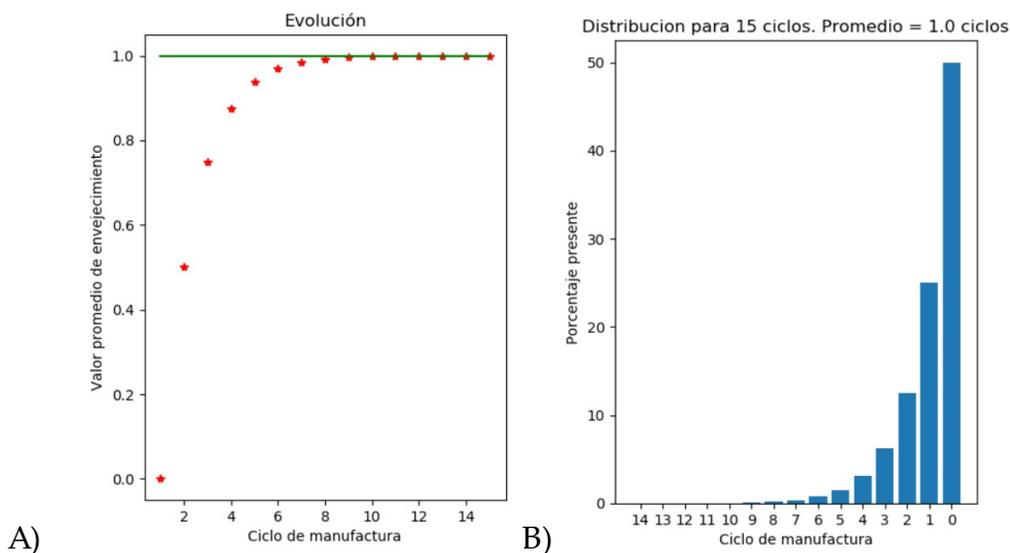


Figura 3-1: A)Evolución del promedio de envejecimiento a lo largo de los ciclos de manufactura. La línea verde indica el valor en el cual este porcentaje de envejecimiento deja de tener una variación mayor al 0.1% (Calculado para 50% de polvo virgen adicionado en cada iteración). B) Porcentaje de polvo presente de cada ciclo de manufactura previo al calculado (calculado para el ciclo 15 de manufactura).

Tabla 3-1: Considerando un 50% de polvo virgen adicionado en cada nueva construcción, se muestran los resultados de promedio de envejecimiento para cada ciclo de manufactura.

Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Promedio de envejecimiento</b>	0.0	0.5	0.750	0.875	0.938	0.969	0.984	0.992	0.996	0.998	0.999
<b>% variación</b>	NA	100	33.3	14.3	6.7	3.2	1.6	0.8	0.4	0.20	0.1

Para fines de este documento se toma una variación menor del 0.1% para determinar el ciclo en el cual se llega al promedio de envejecimiento máximo al cual se puede llevar el material tomando en cuenta el Ejemplo 1 en el que la adición de polvo virgen es constante a lo largo de todas las construcciones. En este caso el polvo mantiene un promedio de envejecimiento constante de 1 ciclo después de 10 ciclos de manufactura, lo que nos indica que independientemente de un número infinito de manufacturas, en promedio, el polvo va a tener solo 1 ciclo de envejecimiento.

Los cálculos obtenidos en la Tabla 3-1, son independientes de la masa y el volumen por lo tanto son extrapolables a cualquier proceso de manufactura aditiva donde se reutilice el material sobrante y se adicione un porcentaje conocido de material nuevo.

Con el fin de facilitar el cálculo del envejecimiento del polvo para diferentes cantidades de polvo virgen suministrado en cada construcción y visualizar gráficamente el comportamiento de estas variables, el autor desarrolló (Anexo A) un programa en el lenguaje Python llamado “Edad promedio del polvo después de los ciclos de reutilización” (Figura 3-2) que dentro de sus funciones calcula:

- Masa inicial requerida en el alimentador
- Masa de polvo que se requerirá adicionar en cada iteración
- Masa total del experimento (después de un número de ciclos)

- Ciclo de estabilidad (según %variación)
- Gráfico de promedio envejecimiento vs ciclo de manufactura (Figura 3-1A)
- Gráfico de barras de porcentaje de polvo presente de cada manufactura pasada en un cierto ciclo (Figura 3-1-B)

The screenshot shows a software window titled "Average aging of the powder after reuse cycles". It contains several input fields and calculated values:

- Numero de ciclos a evaluar: 15
- Volumen máximo del contenedor: 100.0 [cm<sup>3</sup>]
- Porcentaje de polvo nuevo: 50 %
- Porcentaje de polvo perdido en tamizado: 2 %
- Error/Diferencia: 0.1 %
- Masa de la muestra de polvo: 40.95 [g]
- Densidad aparente: 8.2 [g/cm<sup>3</sup>]
- Muestra \*Volumen: 0 [cm<sup>3</sup>], \*Masa: 0 [g]
- Masa inicial: 0 [g]
- Polvo perdido en criba \*Volumen: 0 [cm<sup>3</sup>], \*Masa: 0 [g]
- Masa de polvo virgen a suministrar: 0 [g]
- Porcentaje de polvo virgen varia?:
- Calcular masa total para: 15 cycles
- Porcentaje incrementa/decrementa: 0 %
- Masa total del experimento: 0 [g]
- Archivo:
- Ciclo de estabilidad: 0
- Promedio: 0 Cycles
- Calcular distribución para el ciclo: 10

Buttons: Calcular, Salir

Figura 3-2: Ventana de interacción con el programa “Average aging of the powder after reuse cycles”.

Haciendo uso del programa desarrollado para este trabajo, se obtuvieron valores de promedio de envejecimiento en el **ciclo de estabilidad**, siendo el ciclo estabilidad; aquel en el que el promedio de envejecimiento varía menos de un porcentaje de variación (fijado para este trabajo en 0.1%) con respecto del valor anterior de envejecimiento, por lo que se puede afirmar que después de este ciclo, el promedio de envejecimiento no va a cambiar. Para diferentes porcentajes de polvo virgen, estos se graficaron en la Figura 3-3, donde se observa que para porcentajes bajos (menores al 15%) de polvo virgen (como cuando se construyen estructuras de retícula) después de más de 50 ciclos, el polvo puede envejecer hasta presentar partículas que han estado expuestas al medio de manufactura por más de 4 ciclos; así también se puede notar que si el porcentaje de polvo virgen adicionado en cada iteración no supera el 3% el polvo tendrá como máximo 19 ciclos de exposición bajo un porcentaje de variación del 0.1%.

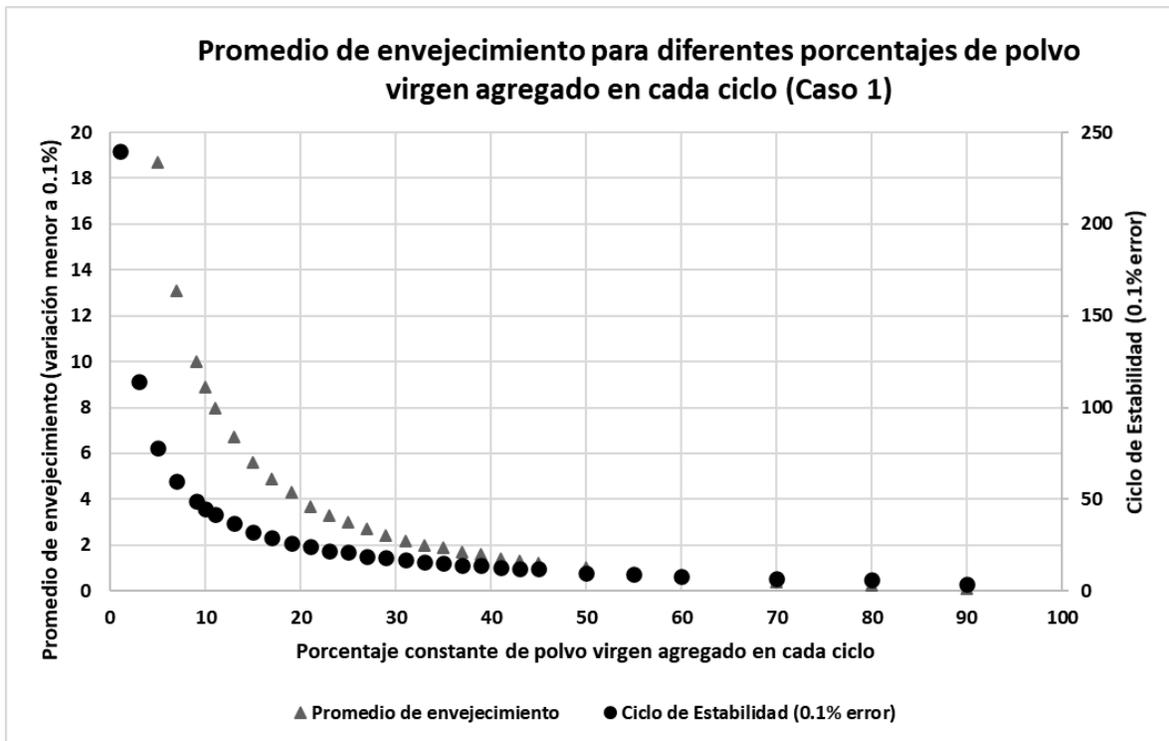


Figura 3-3; La gráfica muestra el valor promedio de envejecimiento en el ciclo de estabilidad para construcciones donde se adiciona un porcentaje fijo de polvo virgen (Ejemplo 1). El ciclo de estabilidad se establece cuando el promedio de envejecimiento no varía más de 0.1%.

El promedio del envejecimiento aumenta conforme disminuye el porcentaje de polvo adicionado en cada iteración, esto se debe a que existe una gran cantidad de polvo del primer ciclo que continúa en las siguientes construcciones, por el contrario, cuando se hacen adiciones importantes de polvo (más del 50%) el polvo no envejece más de un ciclo, ya que este se está renovando casi por completo en cada iteración. Esto se puede ver gráficamente en la Figura 3-4, donde en A) el polvo del primer ciclo, mostrado en la gráfica como con 14 ciclos de envejecimiento, aún aporta un porcentaje importante (10%) del total del polvo, mientras que en B) de la misma figura, las últimas 5 construcciones son las que

aportan un porcentaje al total del polvo, siendo las últimas 3 las que tienen el mayor peso.

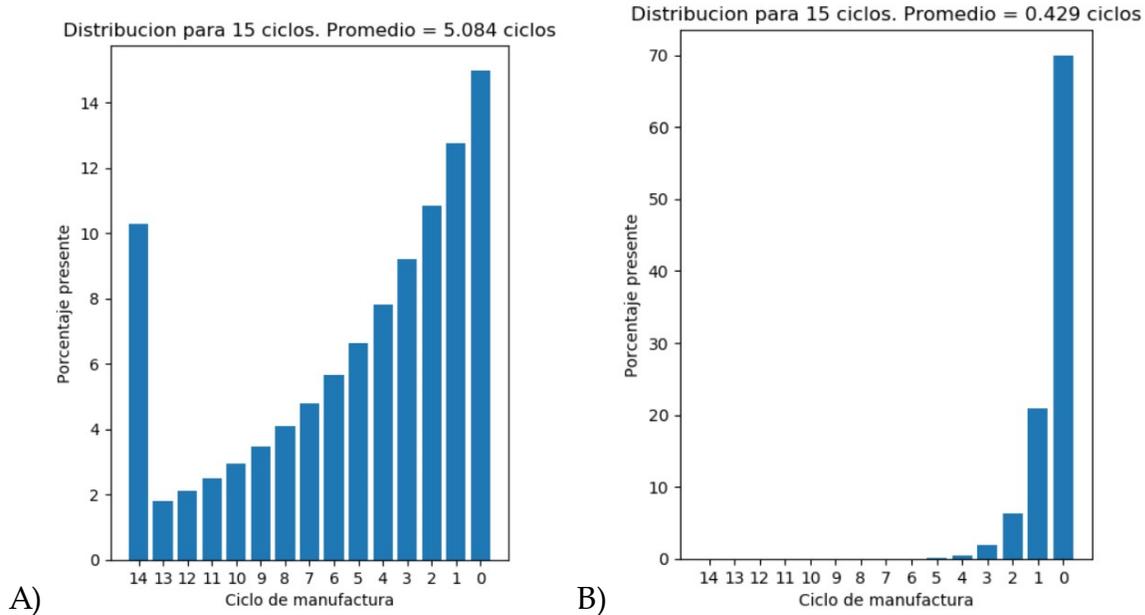


Figura 3-4: Se muestra gráficamente la cantidad de polvo que pertenece a cada ciclo de manufactura para el ciclo 15 tomando en cuenta un % de polvo virgen de: A) 15% y B) 70%.

Hasta ahora se ha hablado del Ejemplo 1, donde el porcentaje de polvo virgen adicionado en cada nueva construcción es constante a lo largo de todas las siguientes manufacturas, sin embargo, esto no ocurre siempre, por lo que se presenta el siguiente ejemplo complementarios al anterior.

**Solidificación y descarte variable (Ejemplo 2, con valores ente 20% y 80%)**

La MA tiene la ventaja de generar piezas diferentes en cada construcción, el caso más común del uso de polvo es cuando se construyen piezas de diferentes volúmenes que consumen en cada nueva construcción una cantidad distinta de polvo, por ello, en este ejemplo se generan las gráficas del Ejemplo 1 tomando en cuenta una variación del polvo virgen adicionado en cada construcción. Este polvo

virgen adicionado se acotó entre el 20% y 80% debido a que la construcciones con LPBF-MA en ningún caso consumen el 100% del polvo y por el otro lado para evitar tener valores de envejecimiento altos. Los datos se obtuvieron con la función de Excel “=ALEATORIO.ENTRE(20,80)” y son mostrados en la Figura 3-4.

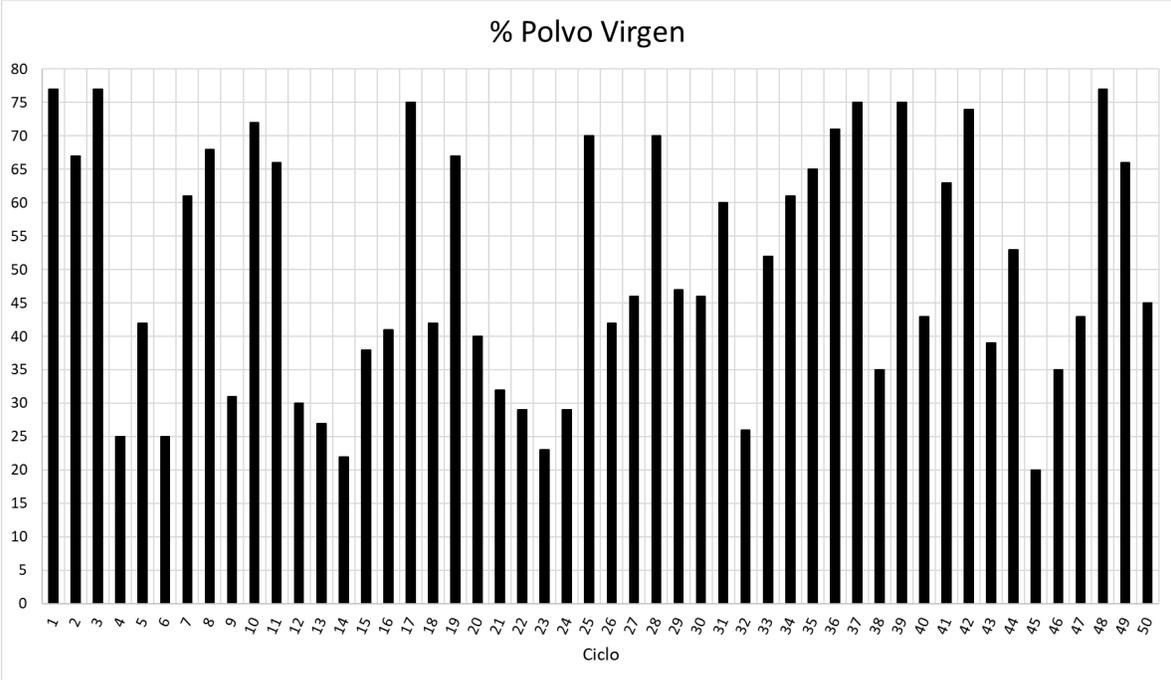


Figura 3-5: Datos que se alimentaron al programa diseñado en este trabajo para obtener el promedio de envejecimiento del Ejemplo 2.

Con los datos de la Figura 3-4 se obtienen las gráficas de la Figura 3-6, donde en A) se puede observar que existe una variación considerable del promedio de envejecimiento, sin embargo, están acotados entre los valores de 2.25 y 0.25, lo que nos dá como indicio que el promedio de envejecimiento del polvo se encontrará dentro de este intervalo cuando hay una tendencia aleatoria en el consumo de polvo de las construcciones. En el ejemplo de Figura 3-6 B), es un ejemplo de cómo se está comportando la cantidad de polvo dentro del ciclo 15 de manufactura en este supuesto donde el porcentaje de polvo virgen es variable.

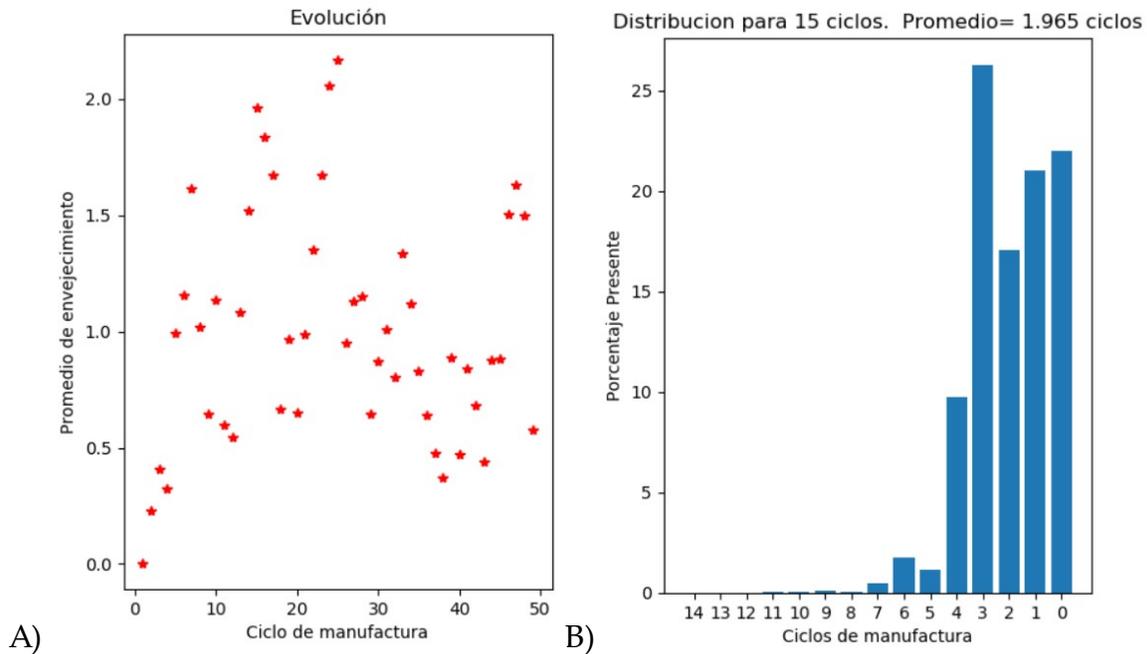


Figura 3-6: A) Promedio de envejecimiento para 50 construcciones con porcentaje de polvo virgen variable en cada nueva construcción. B) Porcentaje de polvo presente de cada ciclo de manufactura en el ciclo 15 de manufactura.

### 3.1 Propuesta experimental

Se propone el siguiente procedimiento experimental, descrito como diagrama de flujo en la Figura 3.1-1 que está diseñado para tener de variable independiente el porcentaje de polvo virgen adicionado en cada nuevo ciclo y de esta manera ajustarlo a una curva similar a la presentada en la Figura 3-1A con lo que se pueda decidir cuando detener el experimento por que se ha llegado a al máximo promedio de envejecimiento del polvo. Este procedimiento tiene como variable respuesta el análisis granulométrico del polvo para obtener datos de distribución de tamaño de polvo (PSD) y factor de forma (PSF) haciendo uso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) así como probetas de tensión basadas en la norma ASTM E8 [64] para análisis de propiedades mecánicas del material y probetas adicionales no normadas para estudios complementarios.

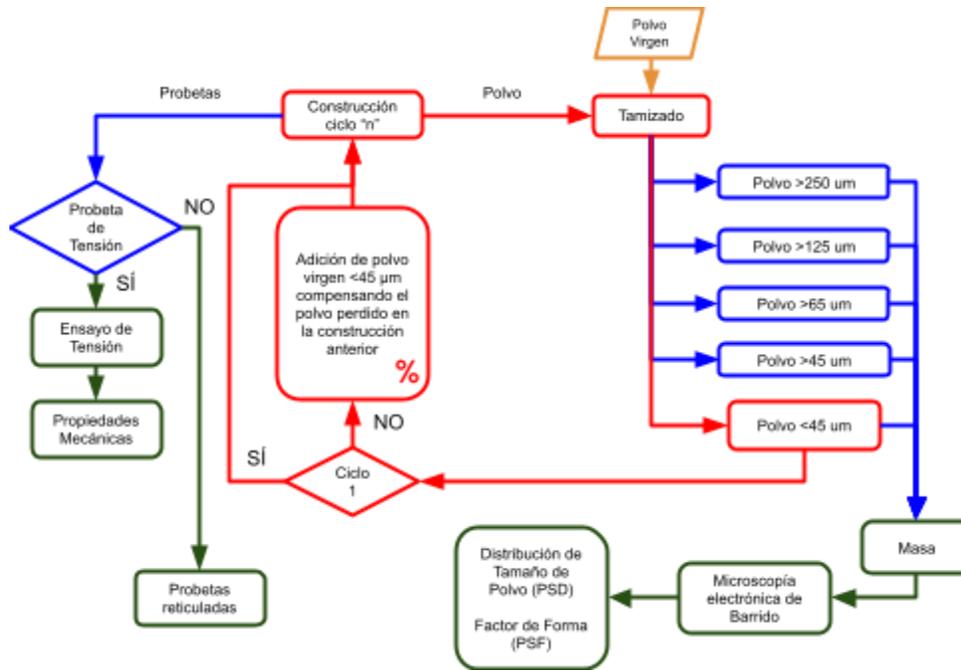


Figura 3.1-1 : Diagrama de flujo del procedimiento propuesto, en naranja se marca la entrada del polvo proveniente de fábrica, en rojo el proceso iterativo de reúso de polvo, en azul la toma de muestras y en verde la evaluación de muestras y sus resultados.

### 3.2 Mallas

El polvo virgen y después de cada construcción; el polvo tiene que ser tamizado para la eliminación de partículas fuera de la distribución seleccionada para la construcción que interfieren en el proceso y que son producidas durante las construcciones; permitiendo así la estandarización del tamaño de partícula, razón por la cual se seleccionó el conjunto de tamices que se muestran en la Figura 3.2-1 acorde a la norma ASTM E11 [65] y tomando en cuenta los tamices más usados por diversos autores [45,49,57,60] durante sus experimentos.



Figura 3.2-1: Arreglo de Tamices usado durante la experimentación.

### **3.3 Microscopio Electrónico de Barrido**

Para determinar la esfericidad y la distribución del tamaño de la diversas muestras de polvo obtenidas durante el procedimiento del tamizado descrito en el diseño experimental, se sugiere tomar imágenes del polvo por la técnica de microscopía electrónica de barrido en una atmósfera de alto vacío con un voltaje de aceleración de 15 kV utilizando el sensor de electrones retrodispersados para favorecer el contraste entre el fondo y las partículas a medir. Esta técnica requiere de un postproceso de análisis de imagen para determinar los parámetros de PSD y PSF por lo que se sugiere el uso del software ImageJ [66], ya que es compatible con otros programas de cómputo y es de licencia de software libre.

### **3.4 Geometrías sugeridas**

Para la experimentación, se propone realizar construcciones sobre las cuales evaluar propiedades mecánicas después de cada ciclo de manufactura y así identificar la relación entre el envejecimiento del polvo y la propiedad ingenieril de tensión.

La geometría que se ha utilizado en trabajos de manufactura aditiva, como [46,67], son probetas planas definidas en la norma ASTM E8 [64], la cual es de fácil orientación en MA.

En el caso de probetas que no requieran estar normadas por que no se usarán para realizar ensayos mecánico, se sugiere hacer uso de estructuras equivalentes en área de contacto, en este caso, estructuras reticuladas, ya que se ha encontrado que estas, por su complejidad, son las que generan una mayor cantidad de contaminación del polvo por los mecanismos mencionados en el apartado 1.4.3.

## 4. Caso de estudio

Haciendo uso de la propuesta experimental presentada en la sección 3.1, se plantea un caso de estudio fundamentado en la Figura 3-3, donde se selecciona como ejemplo un 13% de polvo solidificado durante cada iteración con el fin de obtener un envejecimiento promedio de 6.6 ciclos en 38 ciclos de manufactura, que sería un punto intermedio dentro de gráfica de la Figura 3-3 para lograr un promedio de envejecimiento significativo con un número reducido de iteraciones.

Al inicio del proceso, el polvo proveniente de fábrica, debe ser tamizado usando el arreglo propuesto mencionado en el Capítulo 3.1, el polvo que es menor a los 45  $\mu\text{m}$  es el que será utilizado en las construcciones (polvo virgen).

Para tener un volumen de control donde sea factible agregar el 13% de polvo virgen después de cada construcción, se sugiere adaptar el equipo a construcciones pequeñas como el que se muestra en la Figura 4-1 que es utilizado en un equipo de manufactura de la tecnología *Laser Powder Bed Fusion* el cual cuenta con un láser con potencia máxima de 400W. Así mismo, para evadir la interacción química de la masa fundida con la atmósfera durante las construcciones, se propone utilizar el equipo en una cámara argón con control de Oxígeno.

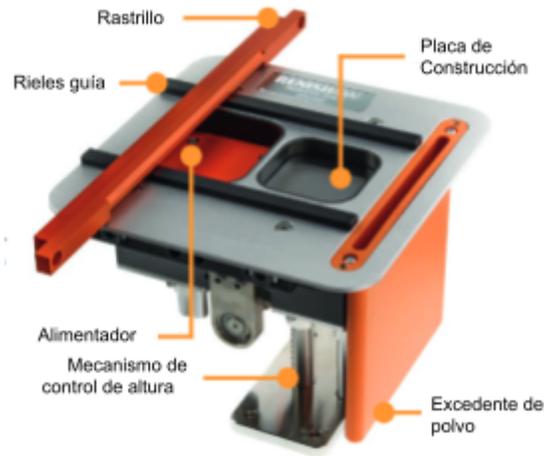


Figura 4-1: Imagen del reductor de volumen de construcción para el equipo AM400 Renishaw tomada de las hojas de datos del equipo [68].

El láser del equipo utilizado en esta propuesta es pulsante por lo que no se realiza un cordón continuo de material evitando problemas de acumulación térmica durante la aceleración y desaceleración en los límites del patrón de escaneo.

Con el fin de evaluar como variable respuesta las propiedades físicas de PSD y SF del polvo, a lo largo de los ciclos de construcción, los parámetros de construcción se mantendrán constantes durante la experimentación.

Los parámetros de manufactura propuestos se muestran en la Tabla 4-1, sin embargo, se sugiere ocupar los valores defecto de la máquina seleccionada.

Tabla 4-1: Parámetros de construcción.

Parámetro	Valor
Velocidad de escaneo	5000 mm/s
Tiempo de exposición	140 $\mu$ s
Retardo del salto entre puntos	500 $\mu$ s
Potencia	40 W
Distancia entre puntos	40 $\mu$ m

Con el fin de mantener el seguimiento de las propiedades mecánicas y su relación con la evolución del polvo reciclado, siguiendo la propuesta metodológica descrita en la Figura 3-5, se recomienda construir tres probetas de tensión conforme a la norma ASTM E8 [64], en este caso las dimensiones de la probeta estándar se redujeron considerablemente como se muestra en la Figura 4-2 con la finalidad de que se ajustaran a las dimensiones de la placa de construcción.

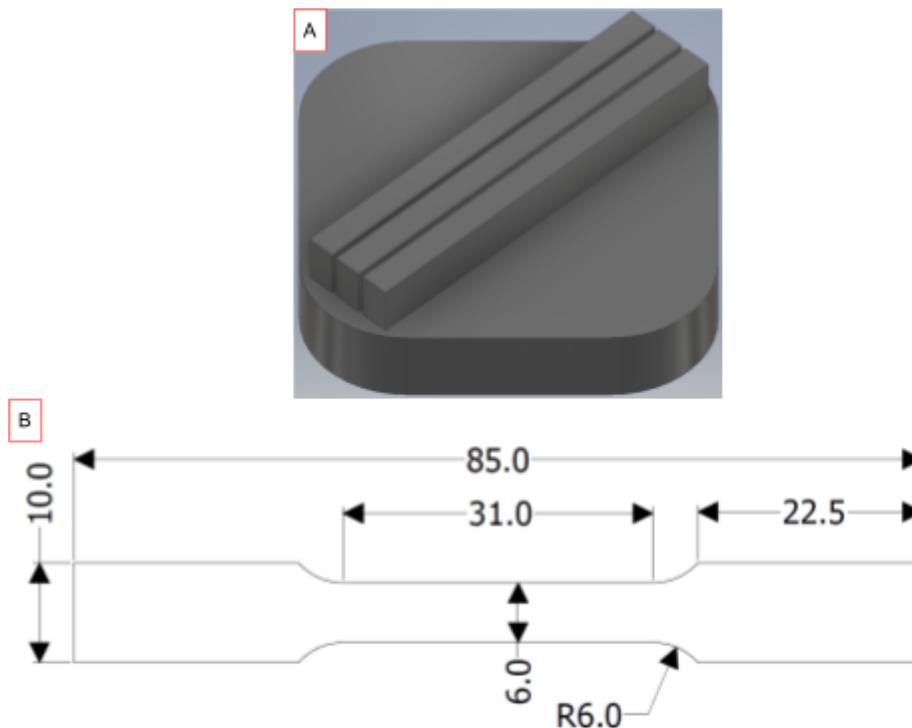


Figura 4-2: A) Representación del acomodo de las 3 probetas de tensión sobre la placa de construcción sin los soportes. B) Dimensiones en milímetros de las probetas de tensión construidas con un espesor de 6 mm.

Para retirar con facilidad las probetas de la placa de construcción y garantizar su correcto anclaje, se colocaron soportes (Figura 4-3), los cuales son estructuras de apoyo, que funcionan especialmente para soportar superficies orientadas horizontalmente y así establecer una separación entre la pieza y la placa de construcción lo que al final del proceso facilita el desprendimiento de las piezas

construidas. Estos soportes son arreglos geométricos de tipo celosía con parámetros específicos, en este caso se propone utilizar los parámetros de la Tabla 4-2, además, las estructuras también funcionan como disipadores de calor, impidiendo el sobrecalentamiento y distorsión de las construcciones [3].

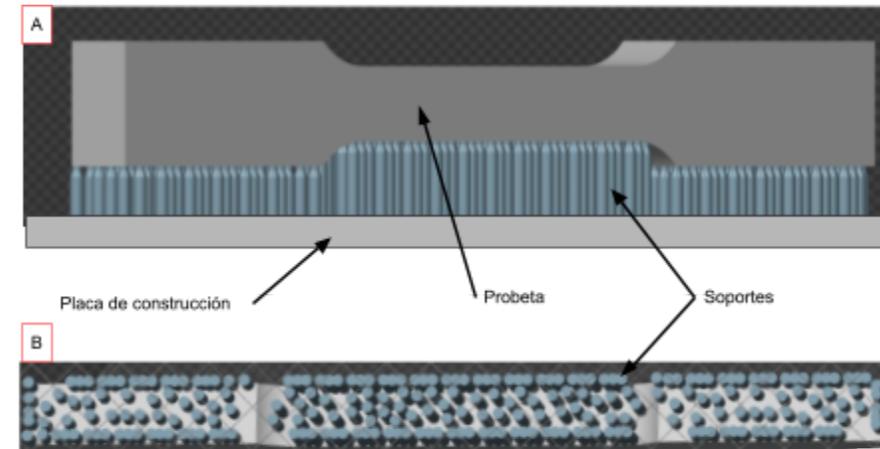


Figura 4-3: Probeta de tensión donde se muestran los soportes en color azul. A) vista lateral, B) vista inferior.

Las probetas propuestas exceden el volumen del 13% que se desea retirar en cada iteración, para compensar este exceso de polvo extraído, se propone realizar series de 3 manufacturas, donde la primera manufactura de la serie son 3 probetas de tensión (Figura 4-2) y en las dos manufacturas subsecuentes se construyen 8 probetas reticuladas en cada una (Figura 4-4), esto con el fin de tener una construcción con la cual se puedan medir propiedades mecánicas y otras en donde se tenga un muy bajo consumo de polvo con un área de exposición equivalente al de las probetas de tensión pero que que permita mantener el envejecimiento del polvo y compensar el polvo excedente que se utilizó en la construcción de las probeta de tensión. Al final de la serie, el polvo adicionado será la suma de haber adicionado 13% en cada construcción. Con estas consideraciones, las probetas resultantes de los ciclos 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 y siguientes hasta los 38 ciclos, serán evaluadas mediante pruebas de tensión; mientras que en los ciclos restantes (2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21, etc. hasta las 37 construcciones) serán de

construcción de probetas reticuladas las cuales son de volumen mucho menor pero con un área de contacto igual al de las probetas de tensión.

Tabla 4-2: Parámetros de los soportes tipo columna circular utilizados en las construcciones de las probetas de tensión

Diámetro	1.15 mm
Ángulo de la punta	70°
Diámetro de la punta	0.75 mm
Espacio entre los soportes	0.87 mm

Las probetas reticuladas sugeridas tienen la característica de gran cantidad de superficie de exposición con un volumen muy bajo de material, como se mencionó anteriormente, este tipo de probetas fueron seleccionadas para compensar el área superficial de las probetas de tensión pero con un consumo bajo de material.

Para este caso de estudio se retoma la probeta de tensión de la Figura 4-3, la cual tiene un un área superficial de  $26.99 \text{ cm}^2$ , así que, las 3 probetas construidas, generan un área superficial total de  $80.97 \text{ cm}^2$ ; con tal consideración, las probetas reticuladas deben ser equivalentes al área superficial que ocupan las 3 probetas de tensión, por lo que se propone la probeta reticulada de la Figura 4-4.

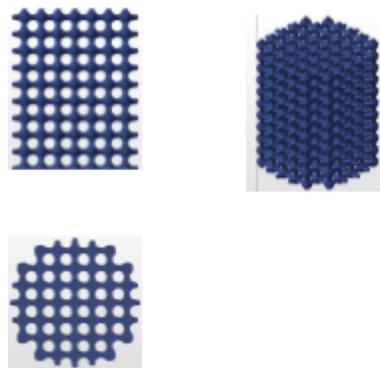


Figura 4-4: Probeta construida con una estructura de retícula.

Esta probeta reticulada está formada por celdas unitarias con geometría cúbica, donde cada celda miden un milímetro por lado y el grosor de los postes (aristas) es de 0.3 mm, esta celda se repite hasta completar el volumen de un cilindro con 9.6 mm de altura y 7.5 mm de diámetro. El área superficial de cada probeta de retícula es de 10.12 cm<sup>2</sup> por lo tanto se requiere la construcción de 8 probetas para igualar el área superficial de las probetas de tensión pero con un volumen de construcción alrededor de 1 cm<sup>3</sup> comparado con los 33.68 cm<sup>3</sup> que consumen las 3 probetas de tensión. La suma de los volúmenes de las probetas de cada serie, al dividirse entre 3, representan el 13% del polvo de cada construcción.

Al finalizar cada manufactura, se analiza la granulometría del polvo sobrante (PSD y PSF) mediante MEB técnica que también permite revisar fenómenos adversos en el polvo, como los que se describen en el apartado 1.4.3 y se registrando las masas retenidas en cada malla bajo el mismo arreglo de mallas del polvo de fábrica, siendo el polvo de tamaño menor a 45 µm el que se reutiliza en el siguiente ciclo y al cual se le adiciona polvo virgen para compensar el polvo perdido durante el ciclo finalizado manteniendo una masa constante, en este caso utilizando el dispositivo de manufactura de la Figura 4-1 contiene una masa de 800 gramos en el contenedor del alimentador.

La implementación de esta propuesta se realiza en un borrador de artículo *Recycled powder ageing model based on morphology evolution for the LPBF-MA process* [69] el cual se encuentra bajo proceso de arbitraje y donde se presentan los modelos matemáticos que se ajustan a las curvas generadas por las variables respuestas.

## 5. Conclusiones

En este documento se realiza una revisión documental del proceso de *Laser Powder Bed Fusión* en el que se detectan áreas de oportunidad en los temas relacionados al reciclado del polvo, ya que los autores reportan modificaciones de las propiedades PSD y PSF del polvo de las piezas construidas sin ligarlas a una edad promedio de envejecimiento del polvo, por esta razón se justifica la propuesta de utilizar al porcentaje de polvo virgen que se adiciona en cada nueva construcción para calcular el promedio de envejecimiento del polvo, que en el caso de que esta adición de polvo sea constante, el polvo llegará a un máximo de envejecimiento después de una cierta cantidad de ciclos, como se ha presentado en el Ejemplo 1, mientras que si la cantidad de polvo virgen que se mezcla con el recuperado es aleatoria, se tienen la tendencia a mantener el polvo en un promedio de envejecimiento acotado (Ejemplo 2). En ambos ejemplos existe un límite en el valor del promedio de envejecimiento, razón por la cual, es posible afirmar que con un adecuado manejo del polvo se pueden mantener las características del mismo a pesar de realizar construcciones aleatorias o iguales de manera rutinaria, lo que también sugiere que no deben existir variaciones significativas en las propiedades físicas de las piezas construidas.

La metodología propuesta para comprobar la relación entre el promedio de envejecimiento del polvo y las propiedades físicas del mismo y propiedades mecánicas del material se reportan en el artículo titulado: *Recycled powder ageing model based on morphology evolution for the LPBF-MA process* (borrador).

## 6. Glosario de términos nuevos

### **Edad de envejecimiento del polvo:**

Hace referencia a la cantidad de ciclos que una masa de polvo metálico ha sido expuesta a la atmósfera de manufactura durante las construcciones.

### **Ciclo de estabilidad:**

Ciclo en el cual el promedio de envejecimiento deja de variar respecto al ciclo de manufactura anterior, tomando en cuenta un % de variación definido.

### **Promedio de envejecimiento:**

Promedio de edad de una masa de polvo que está conformada por una mezcla de polvos con diferentes edades de envejecimiento.

### **Polvo virgen:**

Polvo que no ha sido expuesto a la atmósfera de manufactura durante alguna construcción.

## 7. Referencias

1. Matthews M, Ye J, Gargalis L, Guss G, Khairallah S, Rubenchik A. Absorptivity and energy scaling associated with laser powder bed fusion additive manufacturing. OSA. 2019.
2. Gutierrez-Osorio AH, Ruiz-Huerta L, Caballero-Ruiz A, Siller HR, Borja V. Energy consumption analysis for additive manufacturing processes. Int J Adv Manuf Technol. 2019;105: 1735–1743.
3. Herzog D, Seyda V, Wycisk E, Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. Acta Mater. 2016;117: 371–392.
4. Wang Y, Blache R, Xu X. Selection of additive manufacturing processes. Rapid Prototyping Journal. 2017;23: 434–447.
5. Sames WJ, List FA, Pannala S, Dehoff RR, Babu SS. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. Int Mater Rev. 2016;61: 315–360.
6. BS-ISO-ASTM. Additive manufacturing-General principles-Terminology. BSI

Standards Publication; 2015. Report No.: 52900-2015.

7. Liu WK, Cheng P, Kafka OL, Xiong W, Liu Z, Yan W, et al. Linking Process, Structure, and Property in Additive Manufacturing Applications through Advanced Materials Modelling. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity. 2015; 23–39.
8. Gibson I, Rosen DW, Stucker. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. Springer; 2010.
9. Deckard C, Beaman J, Bourell D. UT ME, Innovation and Leadership. In: Selective Laser Sintering, From a Texas Idea to a Global Industry [Internet]. Jun 2012 [cited Jun 2022]. Available: <https://www.me.utexas.edu/news/619-selective-laser-sintering-from-a-texas-idea-to-a-global-industry>
10. Gokuldoss PK, Kolla S, Eckert J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. Materials. 2017;10: 672.
11. Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews. 2015;2. doi:10.1063/1.4935926
12. Cao S, Chen Z, Lim CVS, Yang K, Jia Q, Jarvis T, et al. Defect, Microstructure, and Mechanical Property of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by High-Power Selective Laser Melting. JOM. 2017;69: 2684–2692.
13. Scipioni Bertoli U, Wolfer AJ, Matthews MJ, Delplanque J-PR, Schoenung JM. On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting. Mater Des. 2017;113: 331–340.
14. Delgado J, Ciurana J, Rodríguez CA. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. Int J Adv Manuf Technol. 2012;60: 601–610.
15. Murr LE, Martinez E, Hernandez J, Collins S, Amato KN, Gaytan SM, et al. Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. Journal of Materials Research and Technology. 2012;1: 167–177.
16. Yao Y, Huang Y, Chen B, Tan C, Su Y, Feng J. Influence of processing parameters and heat treatment on the mechanical properties of 18Ni300 manufactured by laser based directed energy deposition. Opt Laser Technol. 2018;105: 171–179.
17. Gasper AND, Szost B, Wang X, Johns D, Sharma S, Clare AT, et al. Spatter and oxide formation in laser powder bed fusion of Inconel 718. Additive Manufacturing. 2018;24: 446–456.
18. Yan W, Lin S, Kafka OL, Yu C, Liu Z, Lian Y, et al. Modeling process-structure-property relationships for additive manufacturing. Front Mech Eng

- Chin. 2018;13: 482–492.
19. Yan Z, Liu W, Tang Z, Liu X, Zhang N, Li M, et al. Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing. *Opt Laser Technol.* 2018;106: 427–441.
  20. Wang X, Chou K. Effects of thermal cycles on the microstructure evolution of Inconel 718 during selective laser melting process. *Additive Manufacturing.* 2017;18: 1–14.
  21. Hanzl P, Zetek M, Bakša T, Kroupa T. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. Katalinic B., editor. Elsevier Ltd; 2015.
  22. Dowling L, Kennedy J, O’Shaughnessy S, Trimble D. A review of critical repeatability and reproducibility issues in powder bed fusion. *Materials and Design.* 2020;186. doi:10.1016/j.matdes.2019.108346
  23. Li Y, Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Mater Des.* 2014;63: 856–867.
  24. Nie X, Zhang H, Zhu H, Hu Z, Ke L, Zeng X. Analysis of processing parameters and characteristics of selective laser melted high strength Al-Cu-Mg alloys: From single tracks to cubic samples. *J Mater Process Technol.* 2018;256: 69–77.
  25. Trapp J, Rubenchik AM, Guss G, Matthews MJ. In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Applied Materials Today.* 2017;9: 341–349.
  26. Yang J, Han J, Yu H, Yin J, Gao M, Wang Z, et al. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Mater Des.* 2016;110: 558–570.
  27. Kudzal A, McWilliams B, Hofmeister C, Kellogg F, Yu J, Taggart-Scarff J, et al. Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of Powder Bed Fusion additive manufactured 17-4 stainless steel. *Mater Des.* 2017;133: 205–215.
  28. Karlow Herzog P. Surface characterization in Additive Manufacturing, an empirical study of angular dependency. Diegel O, editor. Master, Faculty of Engineering LTH, Lund University. 2018.
  29. Song B, Dong S, Zhang B, Liao H, Coddet C. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Mater Des.* 2012;35: 120–125.
  30. Keshavarzkermani A, Sadowski M, Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *J Alloys Compd.* 2018;736: 297–305.
  31. Vrána R, Koutný D, Paloušek D, Pantělejev L, Jaroš J, Zikmund T, et al. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. *Materials.* 2018;11. doi:10.3390/ma11091763
  32. Douellou C. Assessment of geometrical defects caused by thermal distortions in

- laser-beam-melting additive manufacturing: a simulation approach. *Rapid Prototyping Journal*. 2019;25: 939–950.
33. Geenen K, Röttger A, Feld F, Theisen W. Microstructure, mechanical, and tribological properties of M3:2 high-speed steel processed by selective laser melting, hot-isostatic pressing, and casting. *Additive Manufacturing*. 2019;28: 585–599.
  34. Spierings AB, Levy G. Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. *Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX; 2009. pp. 342–353.
  35. Kruth J, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, Froyen L, Rombouts M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2005;11: 26–36.
  36. Wan HY, Zhou ZJ, Li CP, Chen GF, Zhang GP. Effect of scanning strategy on grain structure and crystallographic texture of Inconel 718 processed by selective laser melting. *J Mater Sci Technol*. 2018;34: 1799–1804.
  37. Leung CLA, Marussi S, Atwood RC, Towrie M, Withers PJ, Lee PD. In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing. *Nat Commun*. 2018;9: 1355.
  38. Niendorf T, Leuders S, Riemer A, Richard HA, Tröster T, Schwarze D. Highly Anisotropic Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metall Mater Trans B*. 2013;44: 794–796.
  39. King WE, Barth HD, Castillo VM, Gallegos GF, Gibbs JW, Hahn DE, et al. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *J Mater Process Technol*. 2014;214: 2915–2925.
  40. Molitch-Hou M. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing. In: *Engineering.com* [Internet]. Jul 2017 [cited Jul 2018]. Available: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issue-s-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx>
  41. Larrosa NO, Wang W, Read N, Loretto MH, Evans C, Carr J, et al. Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy. *Theor Appl Fract Mech*. 2018;98: 123–133.
  42. Chen H, Gu D. Effect of metallurgical defect and phase transition on geometric accuracy and wear resistance of iron-based parts fabricated by selective laser melting. *J Mater Res*. 2016;31: 1477–1490.
  43. Cherry JA, Davies HM, Mehmood S, Lavery NP, Brown SGR, Sienz J. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015;76: 869–879.
  44. Poorganji B, Ott E, Kelkar R, Wessman A, Jamshidinia M. Review: Materials Ecosystem for Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. *JOM*. 2020;72:

561–576.

45. Sato N, Ito M, Izumida T, Shimizu T, Nakano S. Usability of Ti6Al4V powder via hydride-dehydride process for selective laser melting process. In: Sommitsch C., Ionescu M., Mishra B., Mishra B., Kozeschnik E., Chandra T., editors. 9th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, THERMEC 2016. Trans Tech Publications Ltd; 2017. pp. 1698–1702.
46. Brika SE, Letenneur M, Dion CA, Brailovski V. Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy. *Additive Manufacturing*. 2020;31. doi:10.1016/j.addma.2019.100929
47. Seyda V, Herzog D, Emmelmann C. Relationship between powder characteristics and part properties in laser beam melting of Ti-6Al-4V, and implications on quality. *J Laser Appl*. 2017;29: 022311.
48. Tshabalala LC, Mathe N, Chikwanda H. Characterization of Gas Atomized Ti-6Al-4V Powders for Additive Manufacturing. *Kemi*. 2018;770: 3–8.
49. Nguyen QB, Nai MLS, Zhu Z, Sun C-N, Wei J, Zhou W. Characteristics of Inconel Powders for Powder-Bed Additive Manufacturing. *Proc Est Acad Sci Eng*. 2017;3: 695–700.
50. Sudbrack CK, Lerch BA, Smith TM, Locci IE, Ellis DL, Thompson AC, et al. Impact of powder variability on the microstructure and mechanical behavior of selective laser melted alloy 718. In: Ott E., Groh J., Heck K., Bockenstedt K., Jablonski P., Nagahama D., et al., editors. 9th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications. Springer International Publishing; 2018. pp. 89–113.
51. Foteinopoulos P, Papacharalampopoulos A, Stavropoulos P. On thermal modeling of Additive Manufacturing processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018;20: 66–83.
52. Garboczi EJ, Hrabe N. Particle shape and size analysis for metal powders used for additive manufacturing: Technique description and application to two gas-atomized and plasma-atomized Ti64 powders. *Additive Manufacturing*. 2020;31: 100965.
53. Ferreira T, Rasband W. ImageJ User Guide. 2012. Available: <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>
54. Ruffo M, Tuck C, Hague R. Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. *Proc Inst Mech Eng Pt B: J Eng Manuf*. 2006;220: 1417–1427.
55. Meier B, Skalon M, Warchomicka F, Belei C, Görtler M, Kaindl R, et al. Effect of the reuse of powder on material properties of Ti6Al4V processed by SLM. *AIP Conf Proc*. 2019;2113: 150006.
56. Nandwana P, Peter WH, Dehoff RR, Lowe LE, Kirka MM, Medina F, et al.

- Recyclability Study on Inconel 718 and Ti-6Al-4V Powders for Use in Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2016;47: 754–762.
57. Sutton AT, Kriewall CS, Karnati S, Leu MC, Newkirk JW. Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process. *Additive Manufacturing*. 2020;32. doi:10.1016/j.addma.2019.100981
  58. Ahmed F, Ali U, Sarker D, Marzbanrad E, Choi K, Mahmoodkhani Y, et al. Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel. *J Mater Process Technol*. 2020;278: 116522.
  59. Chandrasekar S, Coble JB, Yoder S, Nandwana P, Dehoff RR, Paquit VC, et al. Investigating the effect of metal powder recycling in Electron beam Powder Bed Fusion using process log data. *Additive Manufacturing*. 2020;32: 100994.
  60. Carrion PE, Soltani-Tehrani A, Phan N, Shamsaei N. Powder Recycling Effects on the Tensile and Fatigue Behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts. *JOM*. 2019;71: 963–973.
  61. Ardila LC, Garcíandia F, González-Díaz JB, Álvarez P, Echeverría A, Petite MM, et al. Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting. *Phys Procedia*. 2014;56: 99–107.
  62. Alamos FJ, Schiltz J, Kozlovsky K, Attardo R, Tomonto C, Pelletiers T, et al. Effect of powder reuse on mechanical properties of Ti-6Al-4V produced through selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020;91: 105273.
  63. Gorji NE, Saxena P, Corfield M, Clare A, Rueff J-P, Bogan J, et al. A new method for assessing the recyclability of powders within Powder Bed Fusion process. *Mater Charact*. 2020;161: 110167.
  64. ASTM International. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International; 2004. Report No.: E8M – 04.
  65. American Society for Testing and Materials. *Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes*. ASTM International; 2001. Report No.: E 11.
  66. 1. JV. Image]. In: *Image Processing and Analysis in Java* [Internet]. 4 Mar 2022 [cited 6 Jun 2022]. Available: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
  67. Irrinki H, Nath SD, Alhofors M, Stitzel J, Gulsoy O, Atre SV. Microstructures, properties, and applications of laser sintered 17-4PH stainless steel. *J Am Ceram Soc*. 2019;102: 5679–5690.
  68. Renishaw. *Reduced Build Volume for AM systems*. 2017. Available: [www.renishaw.com/contact](http://www.renishaw.com/contact)
  69. Ruiz-Huerta L, Moock VM, Ulloa-castillo NA, Segura-Cárdenas E, Vázquez AB, Elias-Zuniga A, et al. Morphological evolution of recycled Inconel 718 powder for

## 8. ANEXO A

Programa en el lenguaje Python llamado “Edad promedio del polvo después de los ciclos de reutilización” desarrollado por: Alan Borbolla V.

```

"""
Created on Wed Jun 3 18:17:08 2020
@author: Alan Borbolla Vazquez
"""
import tkinter
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk
from matplotlib.figure import Figure
raiz = tkinter.Tk()
raiz.title("Average aging of the powder after reuse cycles")
root = tkinter.Tk()
root.wm_title("Average aging of the powder after reuse cycles / Plot")
#raiz.config(bg="white") #background
miFrame=tkinter.Frame()
miFrame.config(width=900,height=500)
miFrame.pack(side='left')
raiz.config(relief="groove")
tamanio=4
Renglon=1
ciclos=tkinter.IntVar()
pctrec=tkinter.StringVar()
pcterror=tkinter.DoubleVar()
volconst=tkinter.DoubleVar()
densidadAparente=tkinter.DoubleVar()
nerror=tkinter.IntVar()
nmedia=tkinter.DoubleVar()
masaInicial=tkinter.DoubleVar()
masaAgregar=tkinter.DoubleVar()
nmasaTotal=tkinter.IntVar()
masaTotal=tkinter.IntVar()
nyGraficaBarras=tkinter.IntVar()
pctsieving=tkinter.DoubleVar()
massPowderSample=tkinter.DoubleVar()
volumeSample=tkinter.DoubleVar()
massSample=tkinter.DoubleVar()
volumeSieving=tkinter.DoubleVar()
massSieving=tkinter.DoubleVar()
variante=tkinter.IntVar()
archivo=tkinter.IntVar()
pctvariante=tkinter.StringVar()
CiclosLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Numero de ciclos a evaluar",padx=tamanio,pady=tamanio)
CiclosLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroCiclos=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=ciclos)
cuadroCiclos.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamanio,pady=tamanio)
Renglon=Renglon+1
pctconstLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Volumen máximo del contenedor",padx=tamanio,pady=tamanio)
pctconstLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroPctconst=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=volconst)
cuadroPctconst.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamanio,pady=tamanio)
errorLabel=tkinter.Label(miFrame,text="[cm^3]",padx=tamanio,pady=tamanio)
errorLabel.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamanio,pady=tamanio)
Renglon=Renglon+1
pctrecLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Porcentaje de polvo nuevo",padx=tamanio,pady=tamanio)
pctrecLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroPctrec=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=pctrec)
cuadroPctrec.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamanio,pady=tamanio)
pctrec1Label=tkinter.Label(miFrame,text="%",padx=tamanio,pady=tamanio)
pctrec1Label.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamanio,pady=tamanio)
sievingLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Porcentaje de polvo perdido en tamizado",padx=tamanio,pady=tamanio)
sievingLabel.grid(row=Renglon,column=4,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroSieving=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=pctsieving)
cuadroSieving.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamanio,pady=tamanio)
pctLabel=tkinter.Label(miFrame,text="%",padx=tamanio,pady=tamanio)
pctLabel.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamanio,pady=tamanio)
Renglon=Renglon+1
pcterrorLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Error/Diferencia",padx=tamanio,pady=tamanio)
pcterrorLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroPcterror=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=pcterror)
cuadroPcterror.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamanio,pady=tamanio)
error1Label=tkinter.Label(miFrame,text="%",padx=tamanio,pady=tamanio)
error1Label.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamanio,pady=tamanio)
sieving1Label=tkinter.Label(miFrame,text="Masa de la muestra de polvo",padx=tamanio,pady=tamanio)
sieving1Label.grid(row=Renglon,column=4,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadro1Sieving=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=massPowderSample)
cuadro1Sieving.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamanio,pady=tamanio)
pctLabel1=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamanio,pady=tamanio)
pctLabel1.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamanio,pady=tamanio)
Renglon=Renglon+1
ppolvoLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Densidad aparente",padx=tamanio,pady=tamanio)
ppolvoLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadroPpolvo=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=densidadAparente)
cuadroPpolvo.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamanio,pady=tamanio)
ppolvo1Label=tkinter.Label(miFrame,text="[g/cm^3]",padx=tamanio,pady=tamanio)
ppolvo1Label.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamanio,pady=tamanio)
sieving1Label3=tkinter.Label(miFrame,text="Muestra *Volumen:",padx=tamanio,pady=tamanio)
sieving1Label3.grid(row=Renglon,column=4,padx=tamanio,pady=tamanio)
cuadro1Sieving12=tkinter.Label(miFrame,textvariable=volumeSample)

```

```

cuadro1sieving12.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamano,pa
dy=tamano)
pctLabel12=tkinter.Label(miFrame,text="[cm^3],
*Masa:",padx=tamano,pady=tamano)
pctLabel12.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamano,pady=ta
manio)
cuadro1sieving121=tkinter.Label(miFrame,textvariable=massSam
ple)
cuadro1sieving121.grid(row=Renglon,column=8,padx=tamano,p
ady=tamano)
pctLabel1a=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamano,pady
=tamano)
pctLabel1a.grid(row=Renglon,column=9,padx=tamano,pady=ta
manio)
Renglon=Renglon+1
MasaLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Masa
inical",padx=tamano,pady=tamano)
MasaLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady=ta
manio)
MasaLabel10=tkinter.Label(miFrame,textvariable=masaInicial)
MasaLabel10.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady=t
amano)
MasaLabel2=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamano,pad
y=tamano)
MasaLabel2.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamano,pady=ta
manio)
sieving1Label31=tkinter.Label(miFrame,text="Polvo perdido en
criba *Volumen:",padx=tamano,pady=tamano)
sieving1Label31.grid(row=Renglon,column=4,padx=tamano,pad
y=tamano)
cuadro1sieving121=tkinter.Label(miFrame,textvariable=volumeSi
eving)
cuadro1sieving121.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamano,p
ady=tamano)
pctLabel121=tkinter.Label(miFrame,text="[cm^3],
*Masa:",padx=tamano,pady=tamano)
pctLabel121.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamano,pady=ta
manio)
cuadro1sieving1211=tkinter.Label(miFrame,textvariable=massSie
ving)
cuadro1sieving1211.grid(row=Renglon,column=8,padx=tamano,
pady=tamano)
pctLabel1a1=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamano,pad
y=tamano)
pctLabel1a1.grid(row=Renglon,column=9,padx=tamano,pady=ta
manio)
Renglon=Renglon+1
MasaLabel1=tkinter.Label(miFrame,text="Masa de polvo virgen a
suministrar ",padx=tamano,pady=tamano)
MasaLabel1.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady=ta
manio)
MasaLabel11=tkinter.Label(miFrame,textvariable=masaAagregar
)
MasaLabel11.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady=t
amano)
MasaLabel12=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamano,pa
dy=tamano)
MasaLabel12.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamano,pady=t
amano)
VariableLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Porcentaje de polvo
virgen varia ?",padx=tamano,pady=tamano)
VariableLabel.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamano,pady=t
amano)
casilla1=tkinter.Checkbutton(miFrame,variable=variante,onvalue
=1, offvalue=0)
casilla1.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamano,pady=tamani
o)
Renglon=Renglon+1
MasaLabel110=tkinter.Label(miFrame,text="Calcular masa total
para ",padx=tamano,pady=tamano)
MasaLabel110.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady=
tamano)
MasaLabel111=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=nmasaTotal)
MasaLabel111.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady=
tamano)
MasaLabel112=tkinter.Label(miFrame,text="cycles",padx=tamani
o,pady=tamano)
MasaLabel112.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamano,pady=
tamano)

```

```

pctvaryLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Porcentaje
incrementa/decrementa",padx=tamano,pady=tamano)
pctvaryLabel.grid(row=Renglon,column=4,padx=tamano,pady=t
amano)
cuadro1pctvary=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=pctvariante)
cuadro1pctvary.grid(row=Renglon,column=5,padx=tamano,pady
=tamano)
pctvary2Label=tkinter.Label(miFrame,text="%",padx=tamano,pa
dy=tamano)
pctvary2Label.grid(row=Renglon,column=6,padx=tamano,pady=
tamano)
VariableLabel1=tkinter.Label(miFrame,text="Archivo",padx=tam
ano,pady=tamano)
VariableLabel1.grid(row=Renglon,column=7,padx=tamano,pady
=tamano)
casilla11=tkinter.Checkbutton(miFrame,variable=archivo,onvalue
=1, offvalue=0)
casilla11.grid(row=Renglon,column=8,padx=tamano,pady=tama
nio)
Renglon=Renglon+1
MasaLabel1102=tkinter.Label(miFrame,text="Masa total del
experimento",padx=tamano,pady=tamano)
MasaLabel1102.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady
=tamano)
MasaLabel1112=tkinter.Label(miFrame,textvariable=masaTotal)
MasaLabel1112.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady
=tamano)
MasaLabel1122=tkinter.Label(miFrame,text="[g]",padx=tamano,
pady=tamano)
MasaLabel1122.grid(row=Renglon,column=3,padx=tamano,pady
=tamano)
Renglon=Renglon+1
errorInstantaneoLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Ciclo de
estabilidad:",padx=tamano,pady=tamano)
errorInstantaneoLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamani
o,pady=tamano)
cuadroerrorInstantaneo=tkinter.Label(miFrame,textvariable=nerr
or)
cuadroerrorInstantaneo.grid(row=Renglon,column=2,padx=tama
nio,pady=tamano)
Renglon=Renglon+1
errorInstantaneoLabel=tkinter.Label(miFrame,text="Promedio:
",padx=tamano,pady=tamano)
errorInstantaneoLabel.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamani
o,pady=tamano)
cuadroerrorInstantaneo=tkinter.Label(miFrame,textvariable=nme
dia)
cuadroerrorInstantaneo.grid(row=Renglon,column=2,padx=tama
nio,pady=tamano)
errorInstantaneoLabel1=tkinter.Label(miFrame,text="Cycles",pad
x=tamano,pady=tamano)
errorInstantaneoLabel1.grid(row=Renglon,column=3,padx=tama
nio,pady=tamano)
Renglon=Renglon+1
MasaLabel1101=tkinter.Label(miFrame,text="Calcular distribuci3n
para el ciclo:",padx=tamano,pady=tamano)
MasaLabel1101.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady
=tamano)
MasaLabel1111=tkinter.Entry(miFrame,textvariable=nyGraficaBa
rras)
MasaLabel1111.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady
=tamano)
Renglon=Renglon+1
ciclos.set(50)
pctrec.set(10)
pcterror.set(0.1)
volconst.set(193.1)
densidadAparente.set(8.19)
nerror.set(0)
nmedia.set(0)
masaInicial.set(0)
masaAagregar.set(0)
nmasaTotal.set(0)
masaTotal.set(0)
nyGraficaBarras.set(1)
pctsieving.set(2)
massPowderSample.set(40.95)
volumeSample.set(0)
massSample.set(0)

```

```

volumeSieving.set(0)
massSieving.set(0)
pctvariante.set(0)
masaTotaln=0.0
nciclos=0
npctrec=0.0
volinicial=0.0
error=0.0
ppolvo=0.0
nTotal=0
volpolvo=[]
pctpolvo=[]
maspolvo=[]
media=[]
varianza=[]
desvest=[]
numeroCiclo=[]
errorInstantaneo=0.0
numeroError=0
yGraficaBarras=[]
xGraficaBarras=[]
nGraficaBarras=0
nPctSieving=0.0
nmassPowderSample=0.0
nvolumSample=0.0
nvariante=0
npctvariante=5
listaPorcentajes=[]
narchivo=0
def calculo():
    global
    nciclos,npctrec,volinicial,error,ppolvo,volpolvo,pctpolvo,maspolvo
    global
    media,numeroCiclo,varianza,desvest,yGraficaBarras,nGraficaBarras
    global
    xGraficaBarras,nPctSieving,nmassPowderSample,nvolumSample,numeroError
    global errorInstantaneo,nTotal,masaTotaln
    numeroCiclo=list(range(1,nciclos+1,1))
    for f in range(1):
        volpolvo.append([])
        pctpolvo.append([])
        maspolvo.append([])
        for c in range(nciclos):
            if f<(nciclos-c):
                if c==0:
                    volpolvo[f].append(volinicial)
                    pctpolvo[f].append(100.0)
                    maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)
                else:
                    volpolvo[f].append((volpolvo[f][c-1])*(1-npctrec/100))
                    pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                    maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)
    for f in range(1,nciclos):
        volpolvo.append([])
        pctpolvo.append([])
        maspolvo.append([])
        for c in range(nciclos):
            if f<(nciclos-c):
                if c==0:
                    volpolvo[f].append(volinicial*(npctrec/100))
                    pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                    maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)
                else:
                    volpolvo[f].append((volpolvo[f][c-1])*(1-npctrec/100))
                    pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                    maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)

#Calculo de la Media
suma=0.0
for k in range(1,nciclos+1):
    for i in range(0,k):
        suma+=((pctpolvo[i][(k-1)-i])/100)*((k-1)-i))+suma
    media.append(suma)
    suma=0.0
#Calculo de la Varianza y Desviación Estándar

```

```

suma=0.0
for k in range(1,nciclos+1):
    for i in range(0,k):
        suma+=(((k-1)-i)**2)*(pctpolvo[i][(k-1)-i]))+suma

    suma=(suma/100.0)-(media[k-1]**2)
    varianza.append(suma)
    desvest.append(((varianza[k-1])**1/2))
    suma=0.0
#Cálculo de la altura de las barras

for i in range(0,nGraficaBarras):
    xGraficaBarras.append(str((nGraficaBarras-1)-i))
    yGraficaBarras.append(pctpolvo[i][(nGraficaBarras-1)-i])

nvolumSample+=(((npctrec/100.0)*volinicial)/(nPctSieving/100.0))
)-((nmassPowderSample/ppolvo)/(nPctSieving/100.0))-volinicial/
(((1)/(nPctSieving/100))-1)
suma2=volinicial
for l in range (1,nTotal):
    suma2=suma2+(volinicial*(npctrec/100))
    masaTotaln=suma2*ppolvo
    errorInstantaneo=100.0
    i=2

while errorInstantaneo>error:

errorInstantaneo=100*((abs(media[i]-media[i-1]))/(media[i-1]))
numeroError=i
i=i+1
if (i+1)>nciclos:
    numeroError=0
    break

def graficar():
    global
    numeroCiclo,media,varianza,desvest,root,numeroError,nciclos
    global yGraficaBarras,xGraficaBarras,nGraficaBarras

    constanteNumeroError=[]
    for i in range(0,nciclos):
        constanteNumeroError.append(media[numeroError])
    root.quit()
    root.destroy()
    root = tkinter.Tk()
    root.wm_title("Gráficas")
    fig = Figure(figsize=(16,6),dpi=100)
    fig.add_subplot(1,3,1,ylabel='Valor promedio de
    envejecimiento',title='Evolución', xlabel='Ciclo de
    manufactura').plot(numeroCiclo,media,'r*',numeroCiclo,constanteNumeroError,'g-')
    fig.add_subplot(1,3,2,ylabel='Desviación
    estandar',title='Standard Deviation', xlabel='Ciclos de
    manufactura').plot(numeroCiclo,desvest,'.')
    fig.add_subplot(1,3,3,ylabel='Porcentaje
    presente',title='Distribucion para '+str(nGraficaBarras)+'
    ciclos. Promedio = '+str(round(media[nGraficaBarras-1],3))+
    ' ciclos', xlabel='Ciclo de
    manufactura').bar(xGraficaBarras,yGraficaBarras)

    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root) # CREAR
    AREA DE DIBUJO DE TKINTER.
    canvas.draw()
    canvas.get_tk_widget().pack(side=tkinter.TOP,
    fill=tkinter.BOTH, expand=1)
    toolbar = NavigationToolbar2Tk(canvas, root)# barra de iconos
    toolbar.update()
    canvas.get_tk_widget().pack(side=tkinter.TOP,
    fill=tkinter.BOTH, expand=1)
    root.mainloop()

def calculo2():
    global
    nciclos,npctrec,volinicial,error,ppolvo,volpolvo,pctpolvo,maspolvo
    global
    media,numeroCiclo,varianza,desvest,yGraficaBarras,nGraficaBarras

```

```

global
xGraficaBarras,nPctSieving,nmassPowderSample,nvolumeSample
e,numeroError
global
errorInstantaneo,nTotal,masaTotal,npctvariante,listaPorcentajes
global narchivo

if narchivo==0:
    if npctvariante>0:
        #Hace una lista con los valores de % Variante
        listaPorcentajes.append(npctrec)
        porcentual=npctrec
        while porcentual<100:
            porcentual=porcentual+npctvariante
            if porcentual>=100:
                break
            listaPorcentajes.append(porcentual)
        listaPorcentajes.append(99.9)
        #Calula el numero de ciclos paa llegar a 100
    else:
        #Hace una lista con los valores de % Variante

        listaPorcentajes.append(npctrec)
        porcentual=npctrec
        while porcentual<100 and porcentual>0:
            porcentual=porcentual+npctvariante
            if porcentual<=0:
                break
            listaPorcentajes.append(porcentual)
        listaPorcentajes.append(0.01)
        #Calula el numero de ciclos paa llegar a 100
    else:
        import csv
        listaPorcentajes=[]
        with open("percent.csv") as archivo:
            cont=csv.reader(archivo)
            for fila in cont:
                listaPorcentajes.append(float(fila[0]))
        ciclosPctVariante=len(listaPorcentajes)
        nciclos=len(listaPorcentajes)

#Hace una lista con el numero de ciclos
numeroCiclo=list(range(1,ciclosPctVariante+1,1))

for f in range(1):
    volpolvo.append([])
    pctpolvo.append([])
    maspolvo.append([])
    for c in range(ciclosPctVariante):
        if f<(ciclosPctVariante-c):
            if c==0:
                volpolvo[f].append(volinicial)
                pctpolvo[f].append(100.0)
                maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)
            else:
                volpolvo[f].append((volpolvo[f][c-1]*(1-listaPorcentajes[c-1]/100
                ))
                pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)

for f in range(1,ciclosPctVariante):
    volpolvo.append([])
    pctpolvo.append([])
    maspolvo.append([])
    for c in range(ciclosPctVariante):
        if f<(ciclosPctVariante-c):
            if c==0:
                volpolvo[f].append(volinicial*(listaPorcentajes[f-1]/100))
                pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)
            else:
                volpolvo[f].append((volpolvo[f][c-1]*(1-listaPorcentajes[c+f-1]/1
                00))
                pctpolvo[f].append(volpolvo[f][c]*100/volinicial)
                maspolvo[f].append(volpolvo[f][c]*ppolvo)

#Calculo de la Media
suma=0.0
for k in range(1,ciclosPctVariante+1):
    for i in range(0,k):
        suma=((pctpolvo[i][k-1])/100)*((k-1)-i)+suma
    media.append(suma)
    suma=0.0

#Calculo de la Varianza y Desviación Estándar
suma=0.0
for k in range(1,ciclosPctVariante+1):
    for i in range(0,k):
        suma((((k-1)-i)**2)*(pctpolvo[i][k-1]))+suma

    suma=(suma/100.0)-(media[k-1])**2
    varianza.append(suma)
    desvest.append((varianza[k-1])**1/2)
    suma=0.0

#Cálculo de la altura de las barras

for i in range(0,nGraficaBarras):
    xGraficaBarras.append(str((nGraficaBarras-1)-i))
    yGraficaBarras.append(pctpolvo[i][nGraficaBarras-1]-i)

nvolumeSample=0.0

masaTotaln=0.0

numeroError=0

def graficar2():
    global
    numeroCiclo,media,varianza,desvest,root,numeroError,nciclos
    global
    yGraficaBarras,xGraficaBarras,nGraficaBarras,listaPorcentajes
    root.quit()
    root.destroy()
    root = tkinter.Tk()
    root.wm_title("Gráficas")
    fig = Figure(figsize=(16,6),dpi=100)

    fig.add_subplot(1,3,1,ylabel='Promedio de
    envejecimiento',title='Evolución', xlabel='Ciclo de
    manufactura').plot(numeroCiclo,media,'r*')
    fig.add_subplot(1,3,2,ylabel='Standard
    Deviation',title='Standard Deviation', xlabel='Ciclo de
    manufactura').plot(numeroCiclo,desvest,'.')
    fig.add_subplot(1,3,3,ylabel='Porcentaje
    Presente',title='Distribucion para '+str(nGraficaBarras)+'
    ciclos', xlabel='Ciclos de
    manufactura').bar(xGraficaBarras,yGraficaBarras)

    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root) # CREAM
    AREA DE DIBUJO DE TKINTER.
    canvas.draw()

    canvas.get_tk_widget().pack(side=tkinter.TOP,
    fill=tkinter.BOTH, expand=1)
    toolbar = NavigationToolbar2Tk(canvas, root)# barra de iconos
    toolbar.update()
    canvas.get_tk_widget().pack(side=tkinter.TOP,
    fill=tkinter.BOTH, expand=1)
    root.mainloop()

def codigoBoton():
    global
    nciclos,npctrec,volinicial,error,ppolvo,volpolvo,pctpolvo,maspol
    vo,media,numeroCiclo
    global
    varianza,desvest,numeroError,nmedia,masaInicial,masaTotal,nm
    asaTotal,masaTotal
    global
    nTotal,yGraficaBarras,nyGraficaBarras,nGraficaBarras,xGraficaB
    arras,pctsieving
    global
    nPctSieving,massPowderSample,nmassPowderSample,volumeSa
    mple,nvolumeSample

```

```

global
massSample,volumeSieving,massSieving,variante,nvariante,pctv
ariante,npctvariante, listaPorcentajes
global narchivo,archivo,errorInstantaneo

masaTotaln=0.0
nciclos=0
npctrec=0.0
volinicial=0.0
error=0.0
ppolvo=0.0
nTotal=0
volpolvo=[]
pctpolvo=[]
maspolvo=[]
media=[]
varianza=[]
desvest=[]
yGraficaBarras=[]
xGraficaBarras=[]
nGraficaBarras=0
nPctSieving=0.0
nmassPowderSample=0.0
nvolumeSample=0.0
npctvariante=0.0
listaPorcentajes=[]
numeroCiclo=[]
errorInstantaneo=0.0
numeroError=0
nvariante=0
narchivo=0
nciclos=int(ciclos.get())
npctrec=float(pctrec.get())
volinicial=float(volconst.get())
error=float(pcterror.get())
ppolvo=float(densidadAparente.get())
nTotal=int(nmasaTotal.get())
nGraficaBarras=int(nyGraficaBarras.get())
nPctSieving=float(pctsieving.get())
nmassPowderSample=float(massPowderSample.get())
nvariante=int(variante.get())
npctvariante=float(pctvariante.get())
narchivo=int(archivo.get())

```

```

if nvariante==0:
    calculo()
else:
    calculo2()

volumeSample.set(round(nvolumeSample,2))
nerror.set(numeroError)
nmedia.set(round(media[numeroError],4))
masaInicial.set(round(volinicial*ppolvo,2))
masaAagregar.set(round(volinicial*ppolvo*(npctrec/100),2))
masaTotal.set(round(masaTotaln,2))
massSample.set(round((nvolumeSample*ppolvo),2))

volumeSieving.set(round(((volinicial-nvolumeSample)*(nPctSievi
ng/100)),2))

massSieving.set(round(((volinicial-nvolumeSample)*(nPctSieving
/100))*ppolvo,2))

if nvariante==0:
    graficar()
else:
    graficar2()

def codigoBoton11():
    raiz.destroy()
    root.quit()
    root.destroy()

buttonEnvio=tkinter.Button(miFrame,text="Calcular",command=
codigoBoton)
buttonEnvio.grid(row=Renglon,column=1,padx=tamano,pady=t
amano)
buttonEnvio=tkinter.Button(miFrame,text="Salir",command=codi
goBoton11)
buttonEnvio.grid(row=Renglon,column=2,padx=tamano,pady=t
amano)
Renglon=Renglon+1
raiz.mainloop()

```