



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE
INGENIERÍA**

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

***ESTUDIO DE LA RUGOSIDAD EN EL PROCESO DE
MANUFACTURA ADITIVA "BINDER JETTING" PARA
SU APLICACIÓN EN CONDICIONES RESILIENTES***

TESINA

QUE OPTA PARA OBTENER EL GRADO DE:

Especialista En Manufactura

Opción Terminal Procesos de Manufactura

PRESENTA:

Ing. Carlos Eduardo Canales Ocampo

DIRECTOR DE TESINA:

Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



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.

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo durante todos mis años de vida y de estudio y por la educación y los valores que me han inculcado que me han hecho crecer como persona y dar origen el ser humano que soy ahora.

Al Dr. Leopoldo Ruiz, por guiarme en esta etapa de mi formación profesional.

A mis profesores de la especialización, por su dedicación y compromiso con la formación de los alumnos y por compartir su conocimiento y sus experiencias en su vida profesional y en su vida diaria.

A mis amigos, por su apoyo y las risas y buenos momentos que hemos pasado juntos.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por todo el apoyo que he recibido, la formación y los conocimientos que me han compartido.

Índice

Lista de Figuras	5
Lista de Tablas	7
Introducción	9
1. Antecedentes	10
1.1 La necesidad de resiliencia en la industria	10
1.2 Resiliencia en la manufactura	10
1.3 Sistemas de manufactura resilientes y adaptativos	11
1.4 Manufactura aditiva	12
1.4.1 Procesos de manufactura aditiva	12
1.5 Métricas de la rugosidad basadas en altura	13
1.5.1 Rugosidad media aritmética R_a	13
1.5.2 Rugosidad media aritmética S_a	14
2. Planteamiento del problema	15
2.1 Objetivo	16
2.2 Alcances	16
2.3 Limitaciones	16
2.4 Metodología	16
3. Desarrollo	18
3.1 Características del material	18
3.1.1 Geometría de partículas de polvo	18
3.1.2 Características de la distribución estadística de tamaños de partículas de polvo	18
3.2 Tamaño de la gota de aglutinante	24

3.3 Densidad del aglutinante_____	27
3.4 Velocidad de escaneo_____	27
3.5 Velocidad de caída de gotas de aglutinante_____	28
3.6 Frecuencia de alimentación de gotas de aglutinante_____	29
3.7 Tipo de mecanismo de deposición de material en polvo_____	30
3.8 Velocidad transversal del mecanismo de deposición de material en polvo_____	35
3.9 Estrategia de escaneo_____	37
3.10 Orientación de las superficies_____	38
3.11 Número de capas de la construcción_____	39
3.12 Post proceso de sinterizado_____	41
4. Recomendaciones para minimizar la transición entre técnicas de construcción_____	43
5. Conclusiones_____	49
Referencias_____	51

Lista de Figuras

Figura 1. Curva de resiliencia en la manufactura (Weichhart et al. 2021).

Figura 2. Esquema representativo de un perfil de superficie $z(x)$ (Bhushan, 2000).

Figura 3. Expresión matemática para el cálculo de la rugosidad S_a conforme al sistema de referencia mostrado (OLYMPUS, 2017).

Figura 4. Esquema del tipo de sistema de Binder Jetting considerado en el presente estudio (Ziaee et al., 2019).

Figura 5. Imágenes de partículas de material en polvo con diferentes geometrías y acabados superficiales producidos a partir de atomización con gas (Mostafaei et al., 2021).

Figura 6. Esquema del proceso Binder Jetting con deposición de material vía húmeda (Cima et al., 2001).

Figura 7. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido y distribución estadística de tamaños de partícula de los polvos de acero inoxidable LPW 316L empleados en la construcción de las probetas experimentales (Miyanaji et al., 2019).

Figura 8. Representación gráfica de la plataforma de construcción y de las direcciones de deposición de polvo y depósito de aglutinante en la máquina ExOne MLab (Miyanaji et al., 2019).

Figura 9. Densidad de compactación de la cama de polvo obtenidas a partir de distribuciones de tamaños de partículas de polvo con diferente amplitud (Miyanaji et al., 2019).

Figura 10. Comparación de las características de una cama de polvo con respecto a diferentes velocidades transversales del mecanismo de deposición de polvo. A la izquierda, densidad de compactación en función de la velocidad transversal, y a la derecha, rugosidad superficial R_a en función de la velocidad transversal (Chen et al., 2020).

Figura 11. Rugosidad R_a sobre el plano XY de tres muestras fabricadas por la máquina ExOne M-Lab utilizando tres distribuciones monomodales de partículas esféricas de polvo con tamaño medio de 14, 31 y 78 micrómetros respectivamente (Miyanaji et al., 2019).

Figura 12. Orientación de las probetas sobre la plataforma de construcción (Myers et al., 2021).

Figura 13. a) Diferentes posiciones de medición de la rugosidad en la superficie de la probeta, b) Dirección transversal de medición de la rugosidad (Myers et al., 2021).

Figura 14. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la superficie y dirección evaluada de las probetas fabricadas por el proceso Binder Jetting con un tamaño de gota de 30 pL (Myers et al., 2021).

Figura 15. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la superficie y dirección evaluada de las probetas fabricadas por el proceso Binder Jetting con un tamaño de gota de 10 pL (Myers et al., 2021).

Figura 16. Comparación de la profundidad de penetración del aglutinante: a) una sola gota, b) tres gotas traslapadas, y c) tres gotas sobrepuestas (Miyajima et al., 2018).

Figura 17. Resultados experimentales de una prueba realizada con polvo de acero inoxidable 316 para la selección de una separación entre gotas y frecuencia de alimentación de gotas adecuada. Todas las líneas se construyeron a una velocidad de caída de gota de aglutinante de 2.6 m/s. La línea punteada representa una curva ajustada a los puntos experimentales en la frontera que delimita la región de líneas de escaneo construidas exitosamente. Las líneas de escaneo fallidas se clasifican con base en su relación longitud/ancho. Las líneas de escala en las imágenes representan 500 micrómetros (Colton & Crane, 2021).

Figura 18. Diferentes tipos de mecanismo de deposición de material en polvo: a) cuchilla, b) rodillo no rotativo, c) rodillo a rotación frontal, y d) rodillo a contra rotación (Du et al., 2020).

Figura 19. Distribución de las muestras recolectadas por zona de la cama de polvo con respecto a la posición inicial, la dirección de desplazamiento y la trayectoria del mecanismo de deposición de polvo con forma de cuchilla (Ali et al., 2018).

Figura 20. Densidad de compactación relativa medida en las probetas de la parte frontal (F), media (M) y trasera (B) de la cama de polvo (Ali et al., 2018).

Figura 21. Tipos de mecanismos de deposición de material en polvo empleados en las pruebas experimentales: a) mecanismo tipo cuchilla, y b) mecanismo tipo rodillo a contrarrotación (Spath et al., 2014).

Figura 22. Esquema del mecanismo de deposición de polvo en forma de rodillo a contra rotación utilizado en el análisis experimental y de las zonas en las que se midió la rugosidad (Chen et al., 2020).

Figura 23. Distribución estadística de tamaños de partícula e imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM) del polvo de acero inoxidable 316L empleado (Chen et al., 2020).

Figura 24. Variación de la rugosidad Ra en la cama de polvo con respecto a la velocidad transversal de mecanismo de deposición de polvo (Chen et al., 2020).

Figura 25. Esquema de la formación de una línea de escaneo en el proceso de Binder Jetting (Miyajima et al., 2019).

Figura 26. Evidencia de la variación direccional en la Rugosidad Ra en diferentes direcciones sobre el plano XY de tres muestras fabricadas por la máquina ExOne MLab (Miyajima et al., 2019).

Figura 27. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la cara lateral de probetas fabricadas por el proceso de Binder Jetting. Se puede observar que a mayor el ángulo de inclinación mayor es la rugosidad en su superficie (Myers et al., 2021).

Figura 28. Distribución de tamaños de partículas e imagen tomada por microscopía electrónica de barrido (SEM) del polvo de acero inoxidable ExOne 316 utilizado para la construcción de las probetas (Colton et al., 2021).

Figura 29. Rugosidad Sa de las probetas planas fabricadas con diferente cantidad de capas y bajo diferentes parámetros de proceso. El cuadro de texto denota los parámetros de proceso en el siguiente orden: frecuencia de depósito de gotas, distancia entre gotas/líneas de escaneo, espesor de capa (Colton et al., 2021).

Figura 30. Relación experimental entre la rugosidad Ra en diferentes direcciones y el tamaño medio de partícula. A la izquierda, rugosidad antes del sinterizado, y a la derecha, rugosidad después del sinterizado (Miyajima et al., 2019).

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros de proceso empleados para la fabricación de las probetas cúbicas experimentales (Miyajima et al., 2019).

Tabla 2. Distribución estadística de tamaños de partículas de polvo obtenidos del análisis de las muestras recolectadas en cada zona de la cama de polvo (Ali et al., 2018).

Tabla 3. Distribuciones estadísticas de los tamaños de partículas empleados en los experimentos con cada mecanismo de deposición de material en polvo (Spath et al., 2014).

Tabla 4. Criterios de evaluación de calidad de la superficie de la cama de polvo (Spath et al., 2014).

Tabla 5. Resultados cualitativos de las pruebas de deposición de material en polvo (Spath et al., 2014).

Tabla 6. Recomendaciones para minimizar la transición entre técnicas de construcción (Carlos Canales, 2023).

Introducción

A finales del siglo XX y principios del siglo XXI la doctrina industrial dominante hacía énfasis en la expansión comercial y en la búsqueda continua de reducción de costos, enfoques favorecidos paralelamente por la globalización y la apertura de los mercados internos de los países a nivel internacional. En los últimos años las industrias se han percatado que el priorizar por tantos años dichas medidas les han hecho descuidar otros aspectos que, ante la coyuntura cada vez más compleja, cambiante e incierta, empiezan a transformarse en vulnerabilidades que ponen en riesgo las actividades industriales y que son cada vez más relevantes de atender. La reciente pandemia de CoViD-19 es un ejemplo de ello, sus impactos evidenciaron la fragilidad de las cadenas de valor industriales vigentes y la necesidad de crear capacidades resilientes ante eventos disruptivos futuros, para aumentar su resiliencia las industrias requieren construir capacidades que les permitan recuperarse de las crisis en el menor tiempo posible.

La manufactura aditiva es un proceso de fabricación cuya mayor libertad geométrica con respecto a la manufacturas conformacional y sustractiva, su poca dependencia de herramientas y herramientas, sus características digitales y la creciente gama de materiales que puede procesar (metales, cerámicos, polímeros, compuestos) le permitirían contribuir a la construcción de estas capacidades resilientes en las industrias de manufactura, sin embargo, al ser un proceso con tecnologías en etapas tempranas de adopción industrial se requieren criterios que tomen en cuenta sus capacidades y limitaciones constructivas para guiar las decisiones gerenciales tanto para facilitar su integración en los sistemas de manufactura como para aumentar la resiliencia industrial, estos dos últimos aspectos se ven favorecidos si se buscan las condiciones en las que se minimice la transición entre técnicas de construcción.

En el presente trabajo se estudia la rugosidad como una característica geométrica que limita la aplicación del proceso de manufactura aditiva *Binder Jetting* como técnica de construcción con el fin de proponer recomendaciones orientadas al diseño, los parámetros de proceso y a las características del material que minimicen la transición entre técnicas de construcción en condiciones resilientes. En la primera parte se da un panorama general acerca de la resiliencia en la manufactura, su relevancia y su relación con el proceso de manufactura aditiva *Binder Jetting* y la rugosidad; en la segunda parte se describen de manera cualitativa y cuantitativa algunas características que se han identificado que determinan la rugosidad en el proceso de *Binder Jetting*; en la tercera parte se desarrollan recomendaciones orientadas al diseño, los parámetros de proceso y a las características del material que reducen la transición entre técnicas de construcción y en la cuarta parte se establecen las conclusiones del trabajo.

1. Antecedentes

1.1. La necesidad de resiliencia en la industria

La interrupción de las cadenas de suministro, los cambios abruptos en la demanda de productos y servicios o la reducción de personal en las fábricas derivada del confinamiento y las políticas sanitarias fueron algunos de los impactos de la pandemia de CoViD-19 en las industrias de manufactura evidenciando la necesidad de desarrollar capacidades de resiliencia para hacerle frente a futuros eventos disruptivos que también podrían poner en riesgo la viabilidad de las actividades industriales como las sequías, las inundaciones, el agotamiento de materias primas y recursos o los conflictos sociales y geopolíticos. Estos eventos disruptivos son ocasionados por variables no controlables altamente cambiantes e inciertas por lo que la mejor estrategia para hacerles frente es estar preparado para responder ante sus impactos en cualquier momento tomando en cuenta todas las posibles adversidades, sus combinaciones y sus diferentes orígenes, magnitudes y duraciones (Kusiak, 2021).

1.2. Resiliencia en la manufactura

El concepto de **resiliencia en la manufactura** se puede explicar mediante la curva de resiliencia (Figura 1) (Weichhart et al., 2021). En esta curva se grafica el valor de algún indicador clave de desempeño (*KPI*, *Key Performance Indicator* por sus siglas en inglés) de interés (por ejemplo, volumen de producción) a lo largo del tiempo para representar el desempeño del sistema de producción antes, durante y después de un evento disruptivo. En un inicio, el *KPI* tiene un desempeño P_0 hasta que en el instante t_d ocurre una disrupción provocando una caída en el valor del *KPI* hasta un nivel P_v , posteriormente las capacidades resilientes del sistema hacen que el valor del *KPI* se recupere hasta alcanzar los niveles previos a la disrupción en el instante t_r .

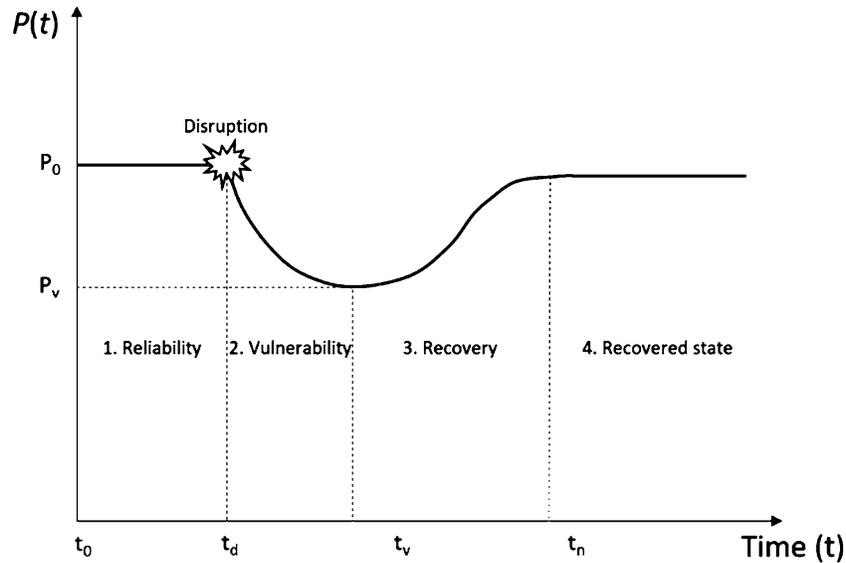


Figura 1. Curva de resiliencia en la manufactura (Weichhart et al. 2021).

1.3. Sistemas de manufactura resilientes y adaptativos

De acuerdo con la Ontología de la Interoperabilidad de la Empresa (OoEI), un sistema está compuesto de elementos, tiene un objetivo y una función que describe el objetivo, sus elementos están completamente integrados, no son independientes entre sí y la función de cada elemento puede operar solo dentro del sistema, tiene control sobre su comportamiento y sigue siempre su objetivo, tiene una interfaz definida que lo distingue del entorno y puede comunicarse e interactuar con este al igual que con otros sistemas por lo cual estos últimos pueden influir en el comportamiento y en la estructura del sistema (Weichhart et al., 2021).

La resiliencia en los sistemas de manufactura se mejora incrementando la robustez y adaptabilidad, la robustez disminuye el impacto del evento disruptivo ($P_0 - P_v$) mientras que la adaptabilidad reduce el tiempo necesario para que el *KPI* regrese a su valor previo a la disrupción ($t_n - t_d$). En los sistemas de manufactura se prefiere la adaptabilidad antes que la robustez ya que permite adaptarse tanto a eventos disruptivos como a cambios graduales, por ejemplo, los ocurridos de manera natural en el mercado y en los deseos del cliente.

Entre las propiedades de los sistemas de manufactura que reducen el tiempo de recuperación del *KPI* y, por lo tanto, aumentan la adaptabilidad y la resiliencia industrial se encuentran la agilidad, la modularidad, la descentralización y la habilidad para aprender. También la arquitectura de un “sistema de sistemas” favorece la adaptabilidad ya que posee varias de las propiedades anteriores.

Un sistema de sistemas es una estructura descentralizada de elementos (sistemas) autónomos que están acoplados flexiblemente (interoperabilidad) para seguir un objetivo superior a los objetivos de los sistemas individuales. Tiene cinco propiedades: **autonomía, pertenencia, conectividad, diversidad y emergencia**. La autonomía de los elementos que componen el sistema de sistemas les permite unirse o separarse de este último mientras persiguen sus objetivos, el acoplamiento no rígido de los elementos hace que las interdependencias de los sistemas del sistema se configuren de manera independiente permitiendo su reconfiguración y el surgimiento de comportamientos emergentes en el nivel superior o global favoreciendo la adaptabilidad. La interoperabilidad a nivel técnico (protocolos de interacción), semántico (modelos) y organizacional es de gran importancia en un sistema de sistemas ya que permite la comunicación, coordinación, cooperación y colaboración en el nivel superior. Si las estructuras de datos de cada elemento son privadas los sistemas del sistema no dependen de las interfaces de los demás para operar por lo que los patrones de interacción entre sistemas no están definidos en ningún sistema permitiendo un desempeño ágil, adaptable y evolutivo (Weichhart et al., 2021).

1.4. Manufactura aditiva

De acuerdo con la norma ISO/ASTM 52900:2015, el término manufactura aditiva se refiere al proceso de unión de materiales para la fabricación de piezas a partir de datos de un modelo tridimensional, típicamente capa por capa, en oposición a las metodologías de manufactura sustractiva y manufactura conformacional.

1.4.1. Procesos de manufactura aditiva

La norma ISO/ASTM 52900:2015 describe siete procesos de manufactura aditiva:

I. *Binder Jetting* (Chorro de aglutinante): proceso de manufactura aditiva en el que un agente aglutinante líquido es depositado selectivamente para unir materiales en polvo.

II. *Directed Energy Deposition* (Deposición con energía dirigida): proceso de manufactura aditiva en el que se utiliza energía térmica concentrada para fundir materiales mientras se van depositando.

III. *Material Extrusion* (Extrusión de material): proceso de manufactura aditiva en donde el material es dispensado selectivamente a través de una boquilla u orificio.

IV. *Material Jetting* (Chorro de material): proceso de manufactura aditiva en donde gotas del material constitutivo son depositadas selectivamente.

V. *Powder Bed Fusion* (Fusión de cama de polvos): proceso de manufactura aditiva en donde energía térmica funde selectivamente regiones de una cama de polvo.

VI. *Sheet Lamination* (Laminación de hojas): proceso de manufactura aditiva en donde hojas de material son unidas para formar una pieza.

VII. *Vat Photopolymerization* (Fotopolimerización en tina): proceso de manufactura aditiva en donde un fotopolímero líquido al interior de una tina es curado selectivamente mediante polimerización activada por luz.

1.5. Métricas de la rugosidad superficial basadas en altura

1.5.1. Rugosidad media aritmética R_a

La rugosidad media aritmética R_a es una métrica estandarizada por la norma ISO 4287:1997/AC:2010 basada en la medición de la altura de las irregularidades de una superficie real a lo largo de una trayectoria lineal con la cual se obtiene un perfil de superficie. Esta métrica se calcula mediante el promedio aritmético de los valores absolutos de las desviaciones verticales del perfil de superficie con respecto a una línea media o línea central (Ecuación 1), siendo esta línea media (Ecuación 2) aquella que divide el perfil de superficie de tal manera que el área superior enmarcada entre el perfil y la línea media sea igual al área inferior enmarcada también por ambas líneas (Figura 2) (Bhushan, 2000).

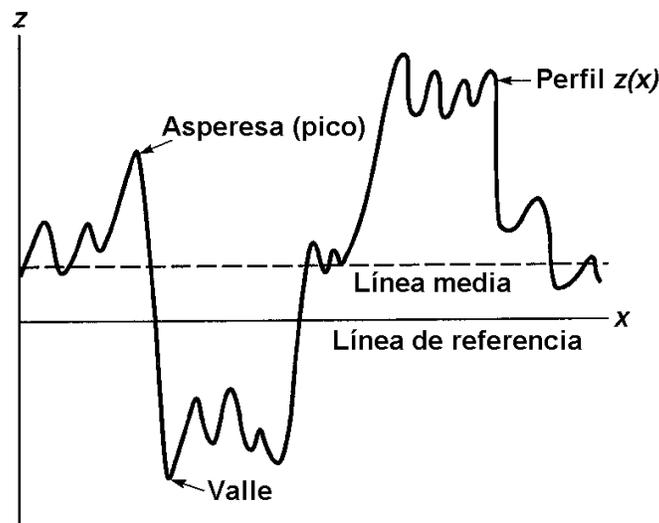


Figura 2. Esquema representativo de un perfil de superficie $z(x)$ (Bhushan, 2000).

$$R_a = CLA = AA = \frac{1}{L} \int_0^L |z - m| dx$$

Ecuación 1. Definición matemática de la rugosidad media aritmética R_a (Bhushan, 2000).

$$m = \frac{1}{L} \int_0^L z \, dx$$

Ecuación 2. Definición matemática de la línea media o línea central (Bhushan, 2000).

1.5.2. Rugosidad media aritmética Sa

Es una extensión de la rugosidad media aritmética Ra al nivel tridimensional, en vez de obtenerse a partir de la medición de la altura de las irregularidades de una superficie real a lo largo de una trayectoria lineal Sa se calcula en la extensión bidimensional de una superficie. Esta métrica se calcula mediante el promedio aritmético de los valores absolutos de las desviaciones verticales de la superficie con respecto a un plano medio o plano central, siendo este plano medio aquel que divide a la superficie de tal manera que el volumen superior enmarcado entre la superficie y el plano medio sea igual al volumen inferior enmarcado también por ambas superficies. Cuando el sistema de referencia se establece de tal manera que se hace coincidir el plano medio con el plano XY la expresión matemática para el cálculo de la rugosidad Sa queda escrita como se muestra en la Figura 3 (OLYMPUS, 2017).

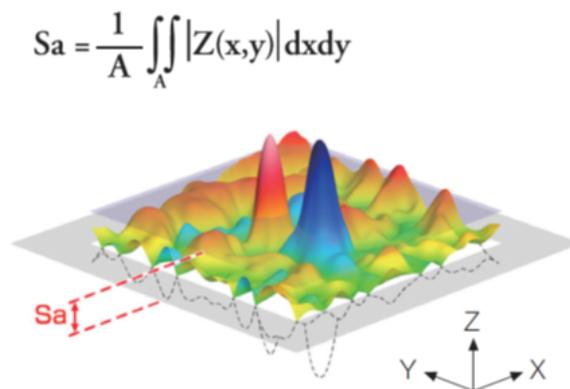


Figura 3. Expresión matemática para el cálculo de la rugosidad Sa conforme al sistema de referencia mostrado (OLYMPUS, 2017).

2. Planteamiento del problema

La manufactura aditiva es un proceso de fabricación cuya mayor libertad geométrica con respecto a la manufacturas conformacional y sustractiva, su poca dependencia de herramientas y herramientas, sus características digitales y la creciente gama de materiales que puede procesar (metales, cerámicos, polímeros, compuestos) podría ayudar a potenciar las propiedades que favorecen la resiliencia de los sistemas de manufactura (Trauth et al., 2021). Para su efectiva integración y uso como detonador de capacidades resilientes se requieren construir guías que ayuden a dirigir las decisiones gerenciales tomando en cuenta las capacidades y limitaciones de la técnica con miras a maximizar la resiliencia. La manufactura aditiva podría mejorar su adaptabilidad si se disminuye la dependencia de los post procesos en la fabricación de piezas, es decir, si con el proceso aditivo se busca obtener características geométricas muy cercanas o idénticas a las características finales deseadas evitando así migrar a otros procesos posteriores como conformacionales o sustractivos.

El proceso de *Binder Jetting* es un proceso de manufactura aditiva basado en polvos cuyos altas capacidades en cuanto a volúmenes de producción, sus bajas temperaturas de procesamiento y su menor requerimiento de estructuras de soporte, a comparación de otros procesos de manufactura aditiva basados en polvos como *Powder Bed Fusion*, le otorga un alto potencial de implementación a escala industrial por lo cual es de relevancia estudiar sus capacidades resilientes de tal manera que puedan ser aprovechadas también a escala industrial (Mostafaei et al., 2021).

En el proceso de *Binder Jetting*, al igual que en otros procesos de manufactura aditiva, se cuenta con características de rugosidad diferentes a las obtenidas por otros procesos como los sustractivos (por ejemplo, fresado o esmerilado), se vuelve relevante el estudio de las capacidades de estos procesos con respecto a esta característica geométrica para identificar las condiciones en las que se pueden obtener valores similares que permitan minimizar la transición entre técnicas de fabricación durante la construcción de una pieza (Jiménez et al., 2019). La rugosidad es una característica geométrica relevante para aquellas piezas sometidas a cargas cíclicas, piezas que formen parte de ensambles y piezas que tengan superficies en contacto y con rozamiento debido a desplazamientos relativos una respecto a la otra. La rugosidad influye en la funcionalidad en estas tres configuraciones, para el caso de las cargas cíclicas altos valores de rugosidad actúan como concentradores de esfuerzos afectando el desempeño mecánico de la pieza. Con respecto a los ensambles, una rugosidad alta hace que no se cumplan las tolerancias requeridas para el ensamble adecuado de las piezas, mientras que en el caso de las piezas con superficies con rozamiento a mayor rugosidad aumenta la vulnerabilidad de las piezas de perder su

función por desgaste superficial y acumulación de calor debido a la fricción entre piezas (Jiang et al., 2019).

2.1 Objetivo

Estudiar la rugosidad del proceso de manufactura aditiva *Binder Jetting*.

2.2 Alcances

- Estudiar la rugosidad del proceso de manufactura aditiva *Binder Jetting* como limitante de su aplicación en condiciones resilientes.
- Identificar y proponer recomendaciones orientadas al diseño, a los parámetros de proceso y a las características del material en polvo que minimicen la migración entre diferentes estrategias de construcción (sustractiva, conformacional y aditiva) con base en estudios experimentales reportados.

2.3 Limitaciones

Se considera el proceso de *Binder Jetting* basado en la deposición sucesiva de capas planas paralelas de material en polvo y con cabezal con boquilla(s) para el suministro de aglutinante (Figura 4).

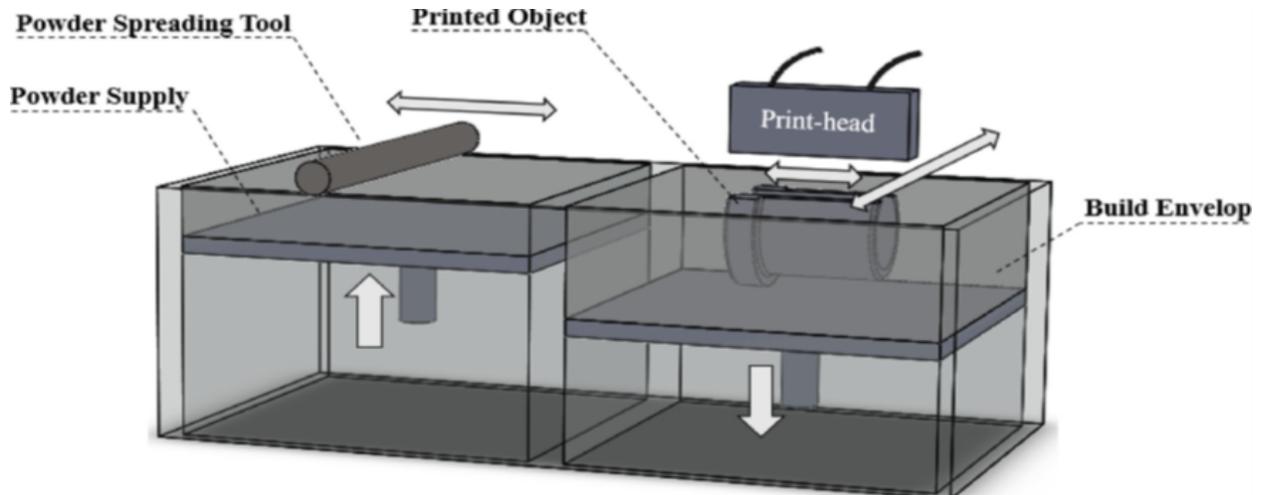


Figura 4. Esquema del tipo de sistema de *Binder Jetting* considerado en el presente estudio (Ziaee et al., 2019).

2.4 Metodología

- Identificar los parámetros del proceso *Binder Jetting* y su relación con la rugosidad con base en la información disponible en la literatura.

- Identificar las características del material en polvo y su relación con la rugosidad con base en la información disponible en la literatura.
- Analizar las relaciones cuantitativas y cualitativas entre las características del proceso y del material con la rugosidad de las construcciones.
- Proponer recomendaciones orientadas al diseño, a los parámetros de proceso y a las características del material que minimicen la transición entre técnicas de construcción.

3. Desarrollo

3.1. Características del material

3.1.1. Geometría de las partículas de polvo

La geometría de las partículas del polvo empleado para la construcción influye en la fluidez del mismo, una geometría altamente regular como la esférica ofrece mayor fluidez con respecto a otras geometrías (Du et al., 2020). A mayor fluidez el material en polvo se distribuye de manera más homogénea sobre la superficie de construcción previniendo la formación de huecos y aglomeraciones en la superficie de la cama que se traduzcan en valles y crestas más pronunciadas y, por lo tanto, valores de rugosidad más altos en la pieza a fabricar (Haeri et al., 2017). La geometría de las partículas también influye en su apilamiento, geometrías altamente irregulares tienen dificultad para acomodarse y compactarse en la plataforma de construcción formando una superficie irregular de la cama de polvo y, por consiguiente, valores de rugosidad mayores que los que se obtendrían con partículas con geometría altamente regular como la de las partículas esféricas (Figura 5) (Fu et al., 2012).

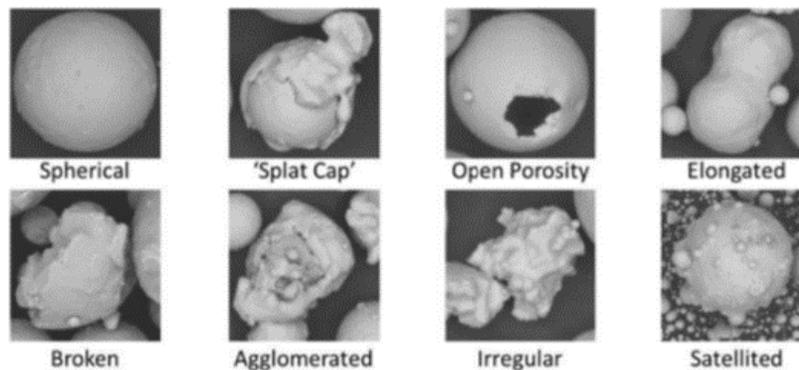


Figura 5. Imágenes de diferentes partículas de material en polvo producidas a partir de atomización con gas (Mostafaei et al., 2021).

3.1.2. Características de la distribución estadística de tamaños de partículas de polvo

El tamaño de las partículas de polvo influye en la fluidez de estos, conforme se disminuye el tamaño de partícula disminuye la masa y las fuerzas de Van der Waals entre partículas comienzan a dominar sobre las fuerzas inerciales y de gravedad dando como consecuencia una disminución en la fluidez de las partículas y la formación de aglomeraciones del polvo de material aumentando la rugosidad de la cama de polvo y de la pieza a fabricar (Chen et al., 2017). Por lo tanto, cuando se tiene la presencia mayoritaria de partículas de polvo finas (< 20 micrómetros) es recomendable depositar el material vía húmeda por medio de un líquido que favorezca su dispersión

homogénea. Para la deposición vía húmeda se mezcla el material en polvo con una solución base alcohol o base agua para formar una suspensión con ~30% de fracción volumétrica sólida, esta suspensión se vierte sobre un sustrato poroso a través del cual se drena la fracción líquida de la suspensión dejando depositada sobre el sustrato una capa de material en polvo, posteriormente se deposita el aglutinante de manera selectiva para formar la geometría deseada (Figura 6) (Cima et al., 2001).

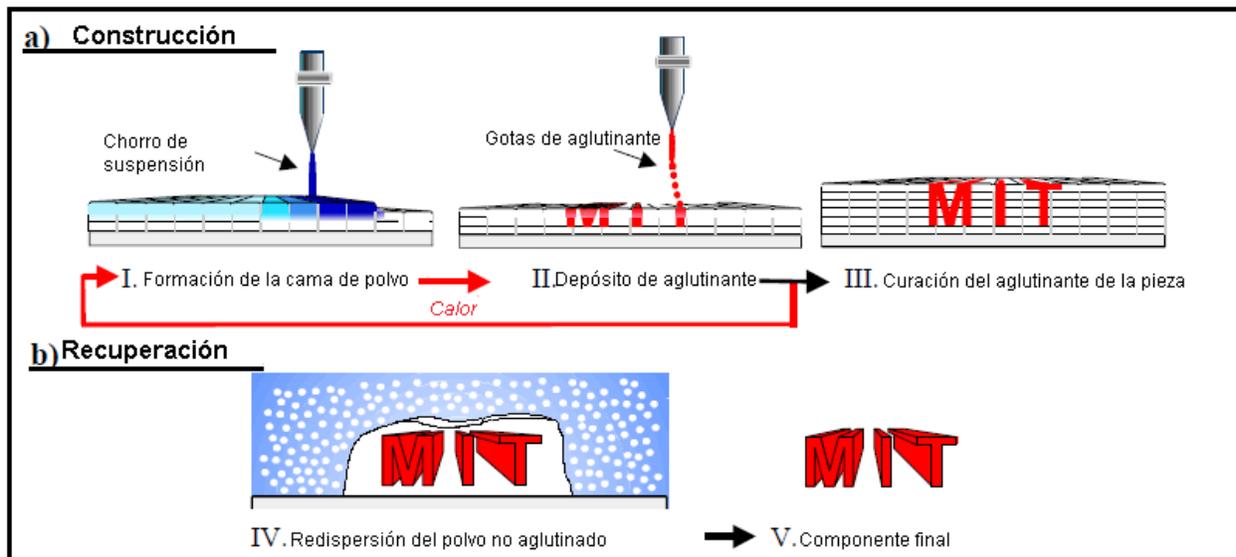


Figura 6. Esquema del proceso Binder Jetting con deposición de material vía húmeda (Cima et al., 2001).

El tamaño máximo de partícula presente en el material en polvo determina el espesor de capa mínimo que se puede emplear durante el proceso ya que si se utilizan valores menores a este tamaño se corre el riesgo de que el mecanismo de deposición de polvo arrastre a las partículas más grandes que sobresalen de la superficie de la cama con lo que se obtendrían capas de polvo con aglomeraciones y huecos afectando la rugosidad de las superficies de la pieza que se desee fabricar (Simchi, 2004). Además, el espesor de capa determina la intensidad del *stairstepping effect* (error geométrico en la suavidad de los contornos de la pieza fabricada debido a la aproximación capa por capa, las cuales dan una apariencia similar al de una escalera) y la rugosidad subsecuente en los bordes y caras laterales de la pieza fabricada, este efecto y la rugosidad lateral se minimiza cuando se emplean valores pequeños de espesor de capa durante el proceso de fabricación (Zhou et al., 2013).

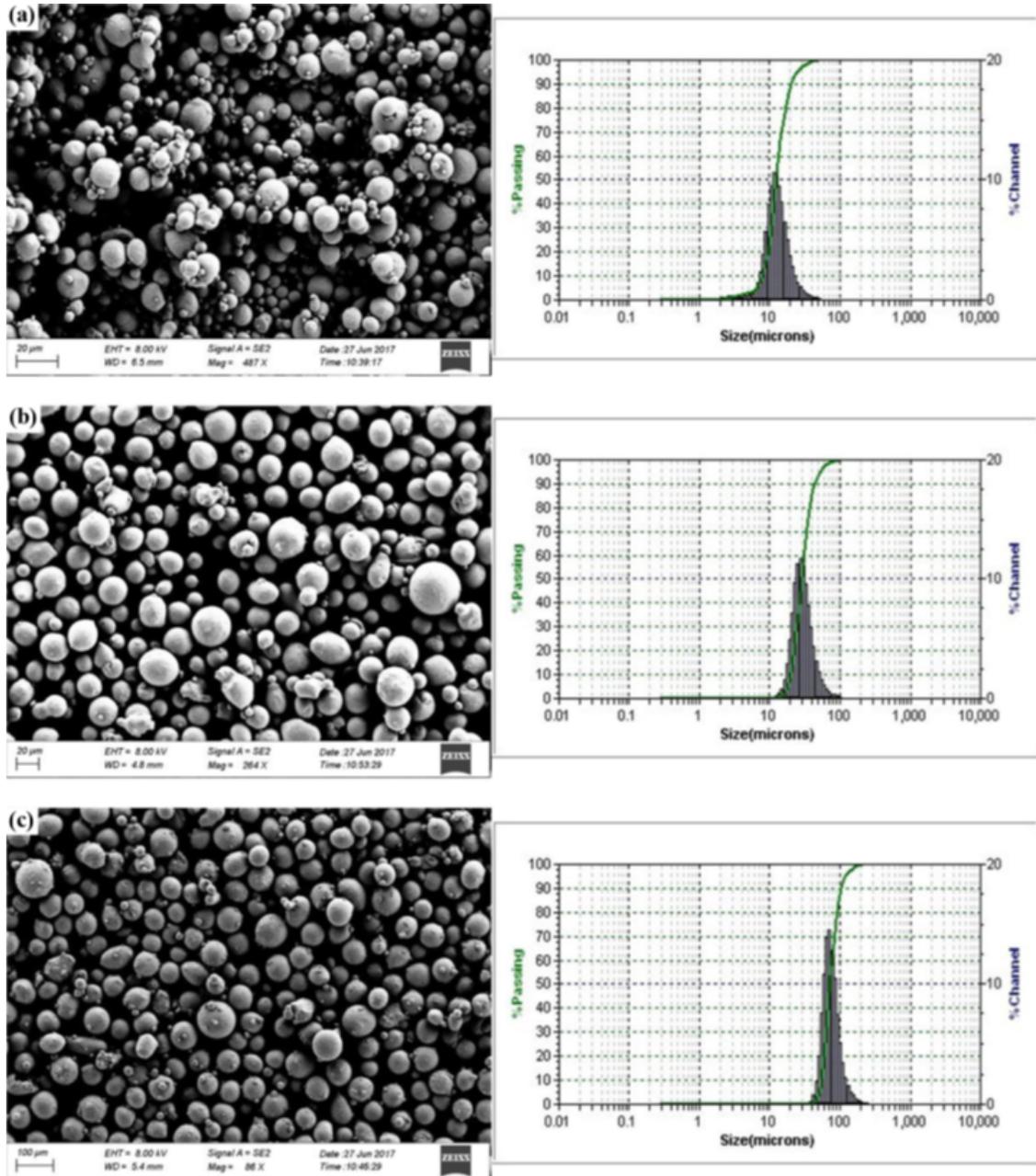
En Miyanaji et al. se reporta la construcción de lotes de probetas cúbicas para evaluar la correlación cualitativa y cuantitativa entre las características del material en polvo y la calidad de las construcciones incluyendo la rugosidad, exactitud dimensional y resistencia mecánica. Para esto se utilizaron polvos de acero inoxidable 316L de la

empresa LPW Technology con geometría esférica y distribuciones monomodales de tamaños de partícula diferentes (Figura 7), una máquina ExOne MLab y el aglutinante PMBSR104 (base éter) para construir cubos de 8 X 8 X 8 milímetros operando bajo los parámetros de proceso de la Tabla 1. Posteriormente se utilizó un perfilómetro Veeco Dektak 8M para medir 5 veces la rugosidad de las probetas en zonas aleatorias de sus superficies superiores en la dirección de depósito de aglutinante y dirección normal al depósito de aglutinante (direcciones Y y X respectivamente como se ilustran en la Figura 8), promediarlas y contrastar los valores obtenidos con el tamaño medio de partícula (Miyanaaji et al., 2019).

Table II Printing parameters used for the M-Lab BJ-AM system

Process parameter	Value
Powder spreading speed (mm/s)	2
Saturation level (%)	100
Drying power (%)	80
Drying time (s)	45
Printing speed (mm/s)	150
Layer thickness (mm)	0.15

Tabla 1. Parámetros de proceso empleados para la fabricación de las probetas cúbicas experimentales (Miyanaaji et al., 2019).



Notes: (a) Powder type I with 5-25 size distribution; (b) powder type II with 15-45 size distribution; (c) powder type III with 44-106 size distribution

Figura 7. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido y distribución estadística de tamaños de partícula de los polvos de acero inoxidable LPW 316L empleados en la construcción de las probetas experimentales (Miyanaji et al., 2019).

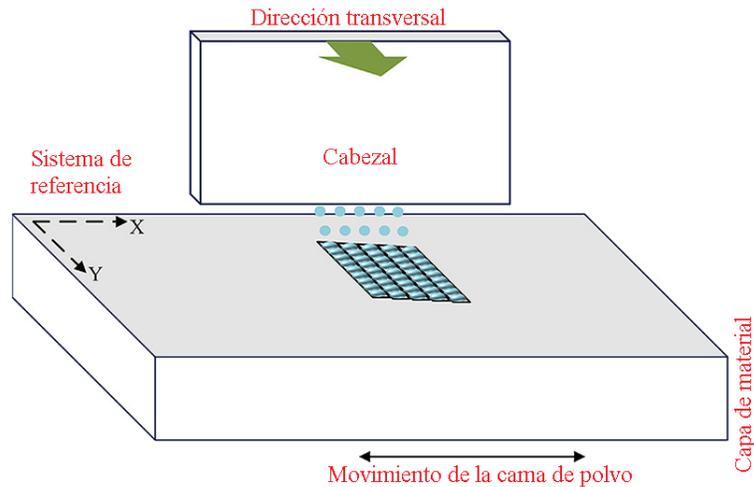


Figura 8. Representación gráfica de la plataforma de construcción y de las direcciones de deposición de polvo y depósito de aglutinante en la máquina ExOne MLab (Miyanaaji et al., 2019).

Los resultados experimentales reportados en Miyanaaji et al. arrojan que a mayor amplitud de la distribución estadística de tamaños de partículas se incrementa la densidad de compactación de la cama de polvo (Figura 9), este fenómeno se le atribuye a que se tiene una mayor diversidad de tamaños de partículas de polvo lo que permite un mayor número de combinaciones posibles para rellenar los huecos internos de la cama (Miyanaaji et al., 2019). A mayor densidad de compactación de la cama de polvo se construyen piezas con valores de rugosidad menores en sus superficies paralelas a la plataforma de fabricación debido a que se disminuye la distancia entre crestas y valles lo que se aprecia experimentalmente en otros estudios (Figura 10) (Ali et al., 2018; Chen et al., 2020).

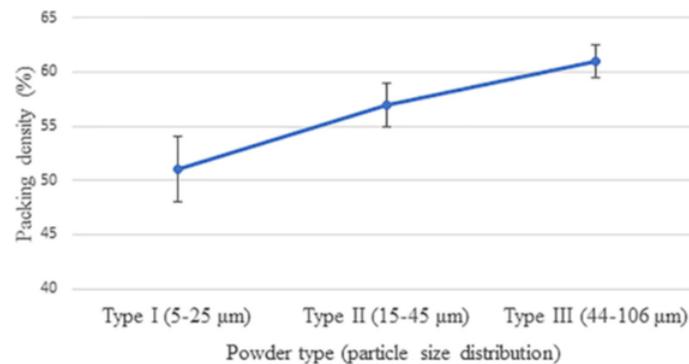


Figura 9. Densidad de compactación de la cama de polvo obtenidas a partir de distribuciones de tamaños de partículas de polvo con diferente amplitud (Miyanaaji et al., 2019).

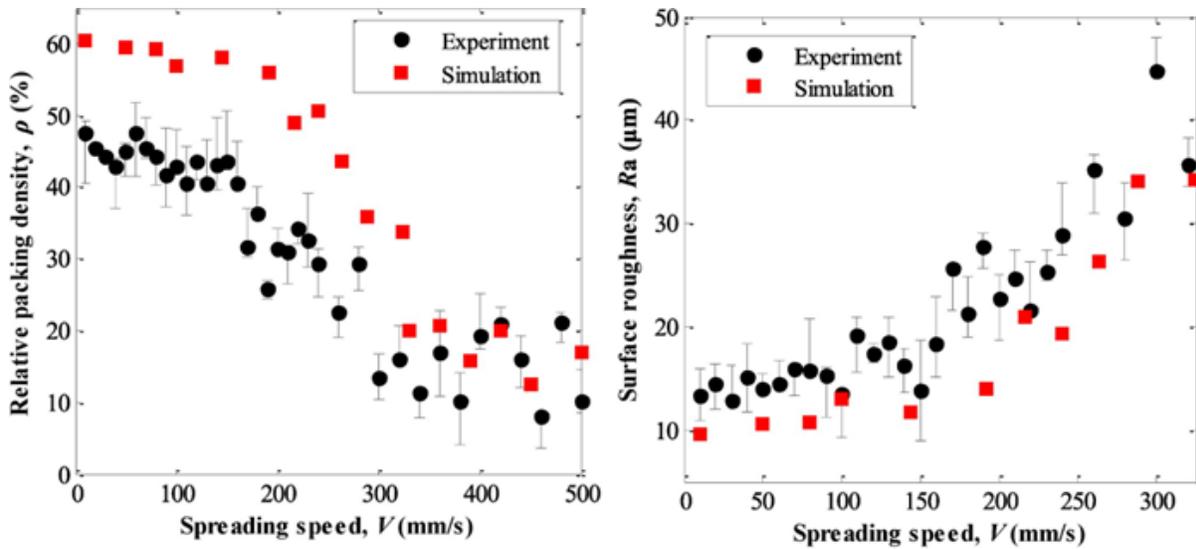


Figura 10. Comparación de las características de una cama de polvo con respecto a diferentes velocidades transversales del mecanismo de deposición de polvo. A la izquierda, densidad de compactación en función de la velocidad transversal, y a la derecha, rugosidad R_a en función de la velocidad transversal (Chen et al., 2020).

De la misma forma, en Miyanaji et al. se observa que a mayor tamaño medio de partícula la rugosidad en las superficies horizontales paralelas a la plataforma de fabricación aumenta (Figura 11). Este efecto se atribuye a que se generan crestas y valles de mayores dimensiones en la cama de polvo (Miyanaji et al., 2019).

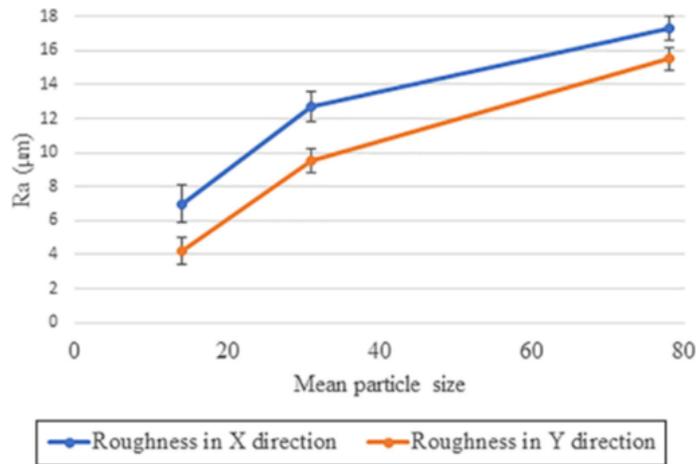


Figura 11. Rugosidad R_a sobre el plano XY de tres muestras fabricadas por la máquina ExOne M-Lab utilizando tres distribuciones monomodales de partículas esféricas de polvo con tamaño medio de 14, 31 y 78 micrómetros respectivamente (Miyanaji et al., 2019).

3.2. Tamaño de gota de aglutinante

El tamaño de gota de aglutinante limita el volumen de aglutinante depositado por gota lo cual influye en los espesores de capa de material en polvo aglutinado que se obtienen durante el proceso y, por lo tanto, la intensidad del *stairstepping effect* y el valor de rugosidad en los bordes y caras laterales de la pieza fabricada (Mostafaei et al., 2021).

En Myers et al. se describe un estudio experimental en donde se construyeron una serie de probetas para cuantificar las relaciones entre la velocidad transversal de deposición del material en polvo, el tamaño de gota de aglutinante, la rugosidad y la orientación de la superficie con respecto a la dirección de deposición de capas. En el experimento se utilizó una máquina ExOne Innovent+ para procesar un polvo de acero inoxidable 316L con distribución de tamaños de partículas D_{10} , D_{50} y D_{90} de 3.5, 7.6 y 15.6 micrómetros respectivamente y un aglutinante ExOne con 70% de saturación para la construcción de un total de 30 probetas de 25.4 X 25.4 X 6.35 milímetros en dos lotes, uno de 15 probetas con un espesor de capa de 50 micrómetros y tamaño de gota de 30 picolitros (pL) y el otro también de 15 probetas pero con un espesor de capa de 30 micrómetros y tamaño de gota de 10 picolitros (pL). Dentro de cada lote, las probetas fueron construidas con ángulos de orientación diferente, empleando los valores de 0° , 22.5° y 45° con respecto a la dirección de deposición de las capas de material en polvo (Figura 12), construyendo 5 probetas por cada ángulo (Myers et al., 2021).

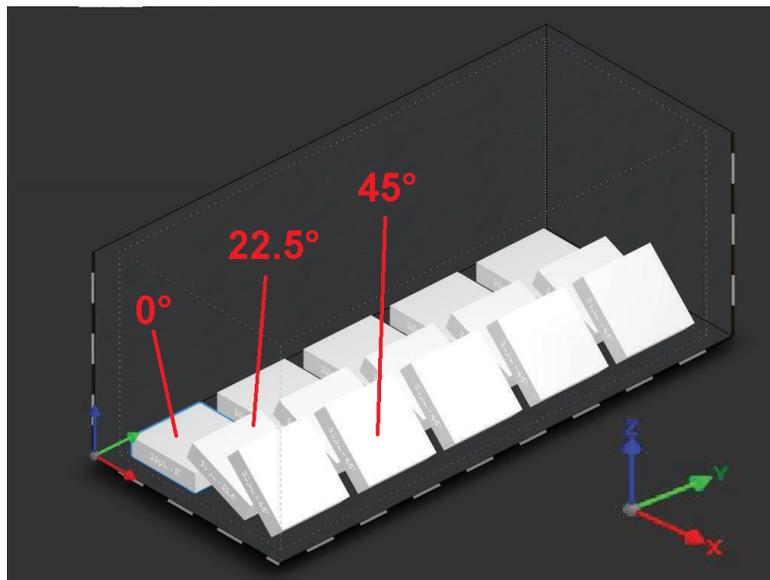


Figura 12. Orientación de las probetas sobre la plataforma de construcción (Myers et al., 2021).

Después de construirse, las probetas fueron curadas a 200 °C durante 8 horas en aire atmosférico y se midió 5 veces la rugosidad en una longitud de 1 milímetro con una galga portátil Phase II con punta de diamante con resolución de 0.001 micrómetros en la superficie y dirección que se muestra en la Figura 13 inciso b.

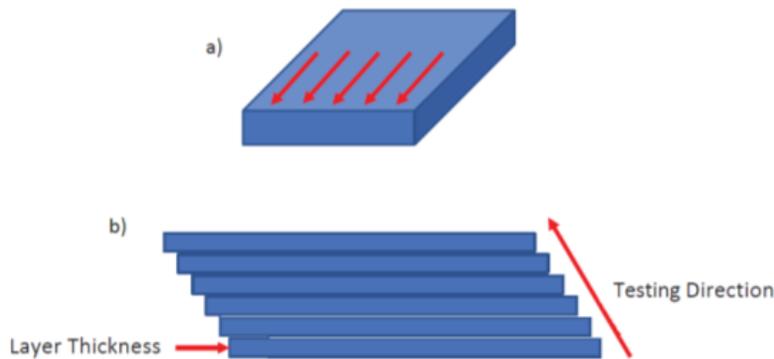


Figura 13. a) Diferentes posiciones de medición de la rugosidad en la superficie de la probeta, b) Dirección transversal de medición de la rugosidad (Myers et al., 2021).

Analizando las Figuras 14 y 15 reportadas en Myers et al se observa que con el tamaño de gota de 30 picolitros, la rugosidad aumenta proporcionalmente con la velocidad transversal del mecanismo de deposición de material en polvo mientras que si se disminuye el tamaño de gota a 10 picolitros dicha relación tiende a invertirse lo cual se observa con la tendencia de la curva a aplanarse. A velocidades transversales mayores a 50 mm/s, cuando se disminuye el tamaño de gota la rugosidad tiende a disminuir (Myers et al., 2021).

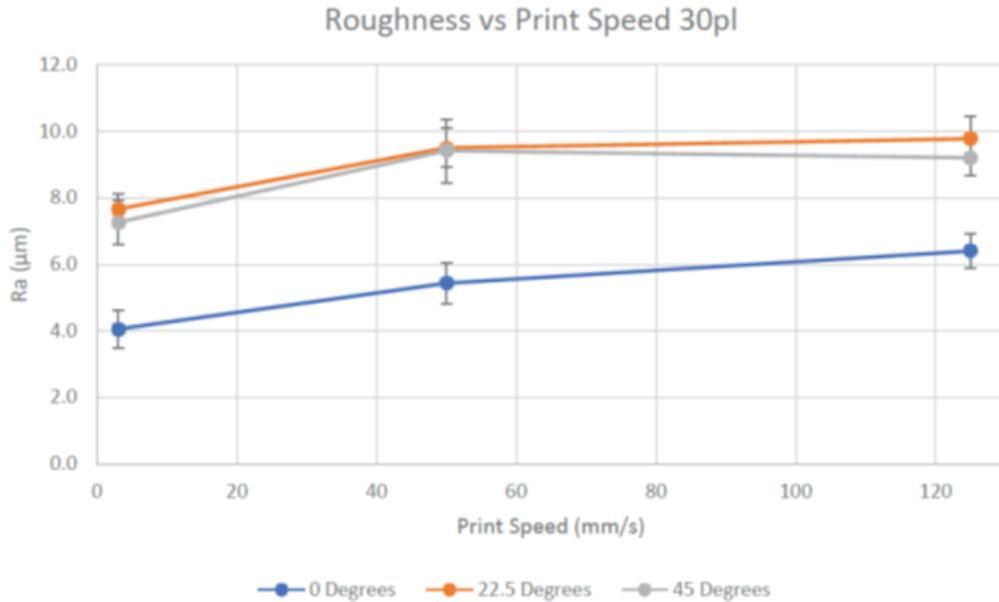


Figura 14. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la superficie y dirección evaluada de las probetas fabricadas por el proceso Binder Jetting con un tamaño de gota de 30 pL (Myers et al., 2021).

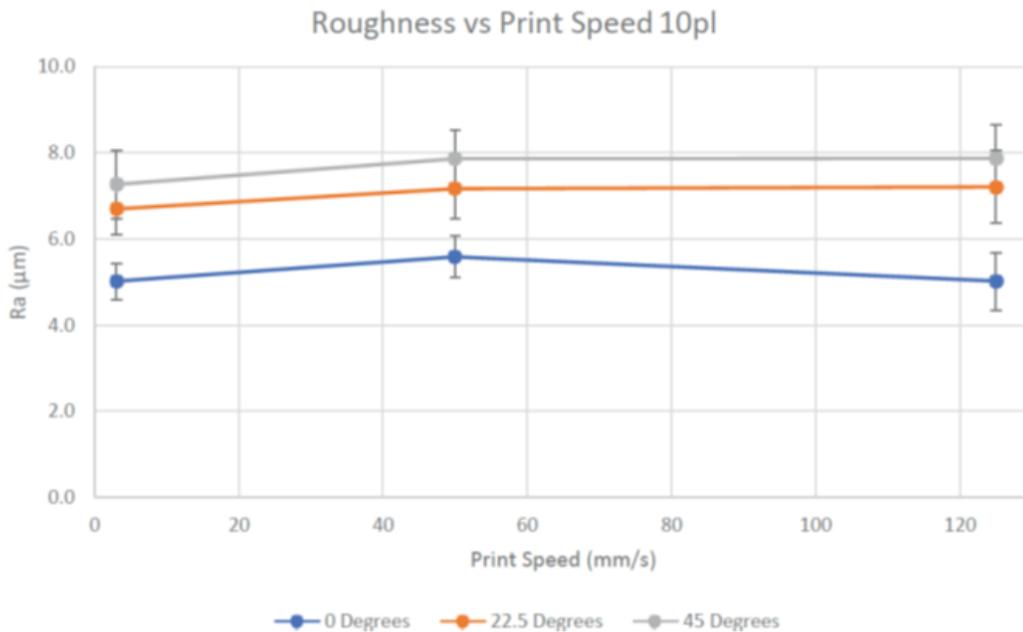


Figura 15. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la superficie y dirección evaluada de las probetas fabricadas por el proceso Binder Jetting con un tamaño de gota de 10 pL (Myers et al., 2021).

3.3. Densidad del aglutinante

La densidad del aglutinante influye en la cantidad de masa que lleva consigo cada gota y, por lo tanto, en la velocidad y la fuerza con la que las gotas de aglutinante caen y se impactan sobre la cama de polvo. La velocidad con la que se deposita el aglutinante sobre la cama de polvo provoca la alteración del tamaño de las gotas de aglutinante durante la caída y al momento del impacto. Si se deposita el aglutinante a velocidades muy altas el efecto conocido como inestabilidad de Rayleigh (fenómeno en el que un chorro de fluido se divide en porciones más pequeñas del mismo volumen pero con menor área superficial debido a la acción de la tensión superficial) puede provocar que se desprendan y dispersen pequeñas porciones de aglutinante conocidas como gotas satélites lo cual reduce el volumen de aglutinante depositado sobre la cama, disminuyendo el espesor de capa de polvo aglutinado, afectando la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en los bordes y caras laterales de la pieza que se construya. Si la velocidad de la gota es muy alta, al momento del impacto con la cama de polvo puede llegar a producirse el efecto conocido como salpicadura o *splashing*, en donde la gota se desintegra parcialmente y se dispersa en los alrededores en forma de gotas más pequeñas lo cual afecta la cantidad de aglutinante depositado, se modifica el espesor de capa de polvo aglutinado y, por lo tanto, la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en las caras laterales de la pieza que se desee construir. De manera similar, la velocidad con la que impactan las gotas sobre la cama influye en la fuerza que las gotas ejercen sobre las partículas de polvo, si esta fuerza es lo suficientemente grande, puede ocurrir el efecto conocido como eyección balística de las partículas o *spattering* en donde la transferencia de momentum entre la gota de aglutinante y las partículas hace que estas últimas se desacomoden y dispersen dando paso a la formación de cráteres que influyen en la rugosidad en la cama de polvo y, por lo tanto, en la rugosidad de la pieza que se desee fabricar (Range et al., 1998).

3.4. Velocidad de escaneo

Si se disminuye la velocidad de escaneo manteniendo los demás parámetros de proceso constantes se aumenta el nivel de traslape entre gotas de aglutinante lo cual incrementa la penetración de aglutinante sobre la cama de polvo (Figura 16). Al incrementarse la penetración del aglutinante se aumenta el espesor de capa de polvo aglutinada dando paso a cambios en la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en los bordes y caras laterales de la pieza que se construya (Miyajima et al., 2018).

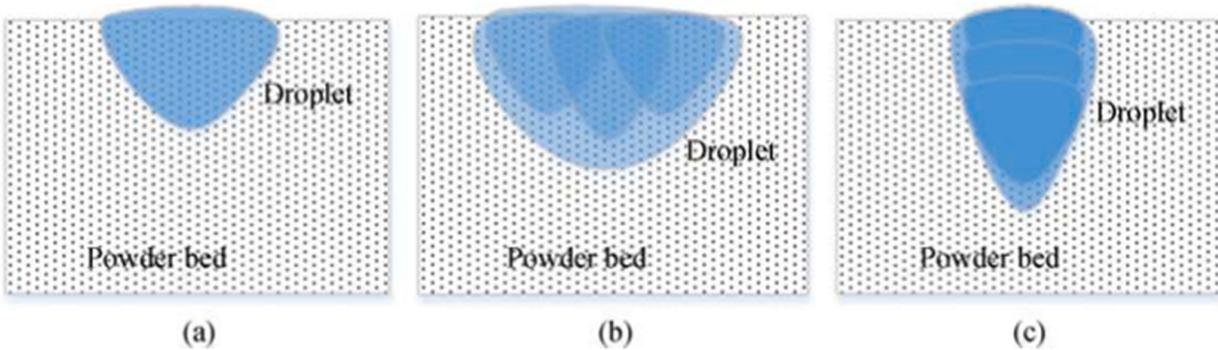


Figura 16. Comparación de la profundidad de penetración del aglutinante: a) una sola gota, b) tres gotas traslapadas, y c) tres gotas sobrepuestas (Miyajima et al., 2018).

Por otra parte, cuando se aumenta la velocidad de escaneo se incrementa la componente tangencial de la fuerza con la que impacta la gota con la cama de polvo causando deformaciones que tienen un efecto desestabilizador del comportamiento mecánico del aglutinante haciendo más propensa la presencia de salpicaduras o *splashing* en donde la gota se desintegra parcialmente y se dispersa en los alrededores en forma de gotas más pequeñas lo cual afecta la cantidad de aglutinante depositado, se modifica el espesor de capa de polvo aglutinado y, por lo tanto, la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en las caras laterales de la pieza que se desea construir (Rein, 1993).

3.5. Velocidad de caída de las gotas de aglutinante

La velocidad con la que caen las gotas de aglutinante sobre la cama de polvo puede provocar la alteración del tamaño de las gotas de aglutinante durante la caída y al momento del impacto. Si se deposita el aglutinante a velocidades muy altas el efecto conocido como inestabilidad de Rayleigh puede provocar que se desprendan y dispersen pequeñas porciones de aglutinante conocidas como gotas satélite lo cual reduce el volumen de aglutinante depositado sobre la cama disminuyendo el espesor de capa de polvo aglutinado afectando la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en los bordes y caras laterales de la pieza que se construya. De la misma forma, si la velocidad de la gota es muy alta al momento del impacto con la cama de polvo puede llegar a producirse el efecto conocido como salpicadura o *splashing* en donde la gota se desintegra parcialmente y se dispersa en los alrededores en forma de gotas más pequeñas lo cual afecta la cantidad de aglutinante depositado, se modifica el espesor de capa de polvo aglutinado y, por lo tanto, la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en las caras laterales de la pieza que se desea construir. De manera similar, la velocidad con la que impactan las gotas sobre la cama influye en la fuerza que las gotas ejercen sobre las partículas de polvo, si esta fuerza es lo suficientemente grande puede ocurrir el efecto conocido como eyección balística de las

partículas de polvo o *spattering* en donde la transferencia de momentum entre la gota de aglutinante y las partículas hace que estas últimas se desacomoden y dispersen dando paso a la formación de cráteres que influyen en la rugosidad en la cama de polvo y, por lo tanto, en la rugosidad en la pieza que se desee fabricar (Fan, 1996).

3.6. Frecuencia de alimentación de gotas de aglutinante

La frecuencia con la que se depositan las gotas de aglutinante sobre la cama de polvo influye en el nivel de traslape de las mismas, a mayor frecuencia mayor es el traslape entre gotas lo cual aumenta el espesor de capa de polvo aglutinado, la intensidad del *stairstepping effect* y la rugosidad en las caras laterales de la pieza a fabricar. Además, si se aumenta la frecuencia de alimentación de gotas (o disminuye el intervalo de tiempo de llegada entre gotas) se disminuye el tiempo disponible para permitir que el aglutinante penetre en la cama de polvo lo cual genera acumulación de aglutinante líquido en la superficie de la cama haciendo más propensa la presencia del *balling effect* que aumenta la rugosidad en las caras de la pieza que se desee fabricar (Figura 17) (Colton & Crane, 2021).

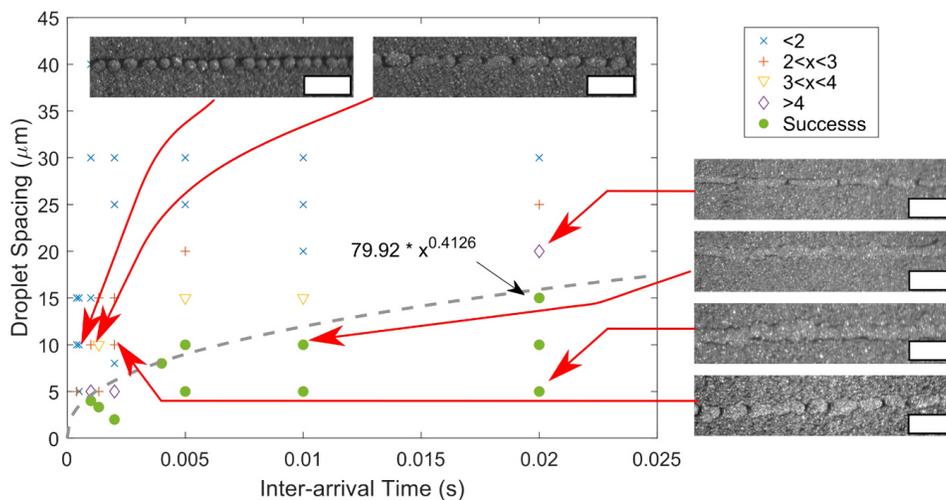


Figura 17. Resultados experimentales de una prueba realizada con polvo de acero inoxidable 316 para la selección de una separación entre gotas e intervalo de tiempo de llegada entre gotas (frecuencia de alimentación de gotas) adecuada. Todas las líneas se construyeron a una velocidad de caída de gota de aglutinante de 2.6 m/s. La línea punteada representa una curva ajustada a los puntos experimentales en la frontera que delimita la región de líneas de escaneo construidas exitosamente. Las líneas de escaneo fallidas se clasifican con base en su relación longitud/ancho. Las líneas de escala en las imágenes representan 500 micrómetros (Colton & Crane, 2021).

3.7. Tipo de mecanismo de deposición de material en polvo

El tipo de mecanismo que se utiliza para suministrar capas nuevas a la cama de polvo (Figura 18) influye en la dispersión, homogeneidad y compactación del material en polvo, entre más homogénea sea la cama de polvo habrá menor cantidad de huecos y aglomeración de partículas lo cual disminuye el tamaño de las crestas y valles en la superficie de la cama reflejándose en una disminución de la rugosidad en las superficies horizontales de la pieza a fabricar (Haeri et al., 2017).

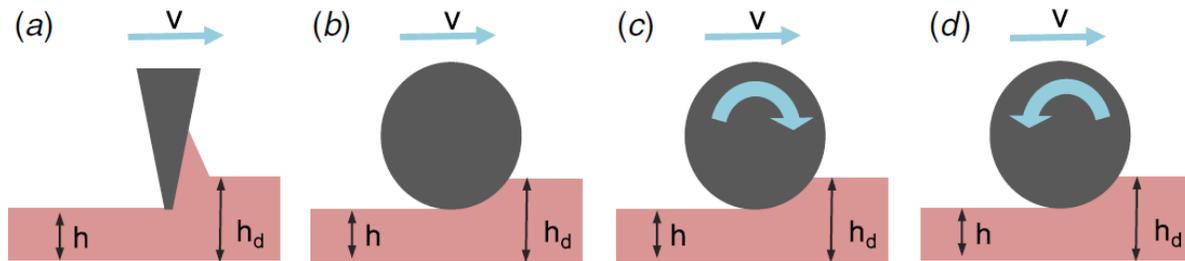


Figura 18. Diferentes tipos de mecanismo de deposición de material en polvo: a) cuchilla, b) rodillo no rotativo, c) rodillo a rotación frontal, y d) rodillo a contra rotación (Du et al., 2020).

En Ali et al. se propone un método para cuantificar la densidad de compactación relativa de una cama de polvo procesada por un mecanismo de deposición de polvo con forma de cuchilla. Para probar la propuesta, se utilizó una máquina EOS M290 para la deposición del polvo EOS Hastelloy X que es una aleación de níquel con distribución tamaños de partícula D_{10} , D_{50} y D_{90} de 15, 30 y 46 micrómetros respectivamente, se depositaron 100 capas de polvo con 20 micrómetros de espesor de capa y se depositó un polímero fotocurable (95% BisfenolA etoxilado diacrilato y 5% óxido de fosfano) mediante una aguja de 0.016 pulgadas de diámetro a una separación de 5 milímetros de la cama de polvo para construir una serie de probetas en diferentes zonas de la cama de polvo, se curó el fotopolímero con radiación ultravioleta y se retiraron las probetas de la cama de polvo. Posteriormente se utilizó tomografía computarizada de resolución nanométrica para medir la densidad de compactación relativa (Ali et al., 2018).

En Ali et al. se concluye que el mecanismo de deposición de polvo con forma de cuchilla produce camas de polvo con variaciones espaciales en su densidad de compactación, siendo la zona más cercana a la posición inicial del mecanismo (Figura 19, Zona F) la que presenta mayor densidad de compactación, la cual va disminuyendo a lo largo de la trayectoria de deposición (Figura 19, Zona M y Zona B). Este fenómeno fue detectado a partir de los datos obtenidos por tomografía computarizada de resolución nanométrica (Figura 20) y sus causas se dedujeron a partir de la medición

de la distribución estadística de tamaños de partículas de polvo de tres muestras de la cama de polvo aglutinadas y recolectadas en cada zona de interés (Figura 17), en las distribuciones resultantes (Tabla 2) se observa un aumento paulatino en el tamaño de partícula en cada zona de la distribución por lo que reflejan una segregación de la fracción volumétrica de partículas de polvo más pequeñas desde la Zona F hacia la Zona B lo cual provoca el efecto observado en la densidad de compactación, este efecto es consecuencia de la interacción entre el mecanismo en forma de cuchilla y la distribución inicial de tamaños de partículas de polvo. Las reducciones obtenidas en la densidad de compactación aumentan la rugosidad en las piezas que se fabriquen en dichas zonas de la cama de polvo debido a que se aumenta la distancia entre crestas y valles por lo que se debe de considerar estos efectos en dicha característica geométrica cuando se construyan piezas empleando el mecanismo en forma de cuchilla (Ali et al., 2018; Chen et al., 2020).

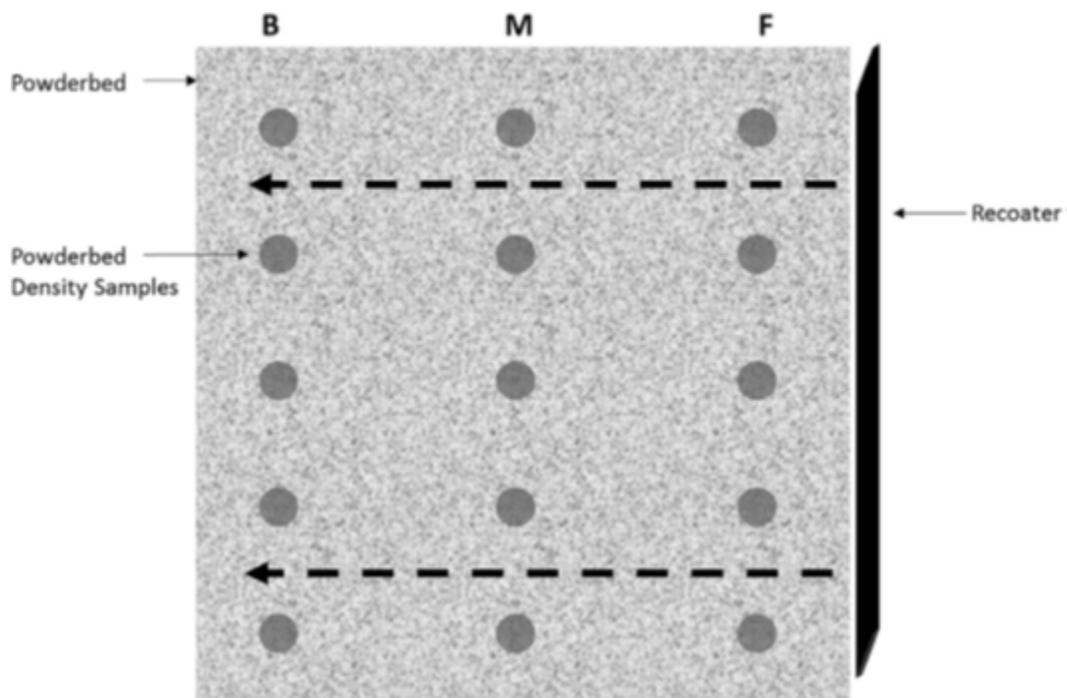


Figura 19. Distribución de las muestras recolectadas por zona de la cama de polvo con respecto a la posición inicial, la dirección de desplazamiento y la trayectoria del mecanismo de deposición de polvo con forma de cuchilla (Ali et al., 2018).

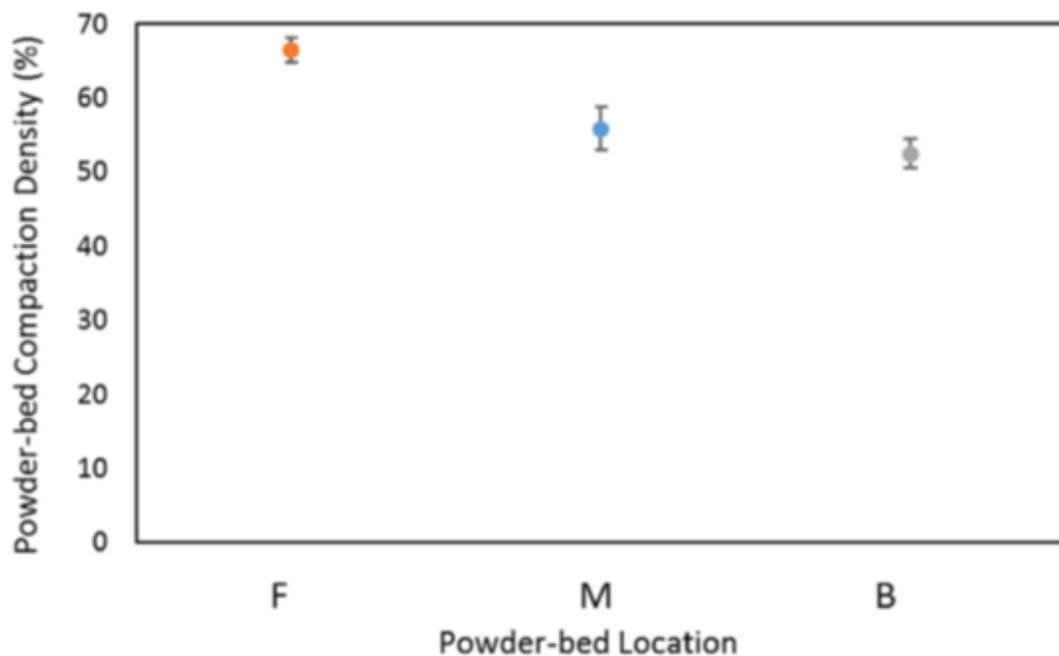


Figura 20. Densidad de compactación relativa medida en las probetas de la parte frontal (F), media (M) y trasera (B) de la cama de polvo (Ali et al., 2018).

	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
F	15	28	45
M	18	32	46
B	19	34	49

Tabla 2. Distribución estadística de tamaños de partículas de polvo obtenidos del análisis de las muestras recolectadas en cada zona de la cama de polvo (Ali et al., 2018).

Por otra parte, en Spath et al. se reporta la ejecución de una serie de experimentos en donde se evalúa cualitativamente la calidad de la superficie de la cama de polvo obtenida con diferentes mecanismos de deposición de material en polvo. El material que se utilizó fue hidroxapatita en polvo HA SP19 de la marca BioCer Entwicklungs-GmbH, separado en ocho fracciones y dos mezclas, cada uno con diferentes distribuciones de tamaños de partículas (Tabla 3).

	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	Span
<32	8.8	20.3	31.0	1.09
32–45	11.4	28.3	43.7	1.14
45–63	15.1	40.2	59.2	1.10
63–80	45.0	63.8	88.3	0.68
80–100	60.0	80.2	108.4	0.60
100–125	72.4	97.7	132.8	0.62
>125	82.9	125.5	178.8	0.76
EG	22.5	58.8	107.4	1.44
>125+15 %	40.2	122.3	173.2	1.09
>125+25 %	36.9	119.9	174.6	1.15

Tabla 3. Distribuciones estadísticas de los tamaños de partículas empleados en los experimentos con cada mecanismo de deposición de material en polvo (Spath et al., 2014).

Los mecanismos de deposición de material en polvo que se emplearon para los experimentos fueron del tipo cuchilla (FiB), del tipo rodillo sin rotación (FiR) y del tipo rodillo a contrarrotación (RotR) (Figura 21), con un diámetro de 25 milímetros. La evaluación de calidad de la superficie de la cama de polvo se realizó con base en la identificación de características y defectos detectables a través de inspecciones ópticas (Tabla 4).

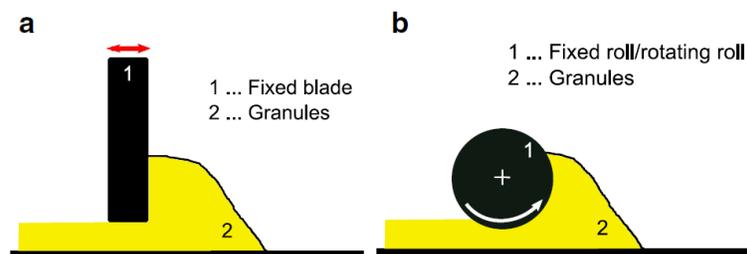


Figura 21. Tipos de mecanismos de deposición de material en polvo empleados en las pruebas experimentales: a) mecanismo tipo cuchilla, y b) mecanismo tipo rodillo a contrarrotación (Spath et al., 2014).

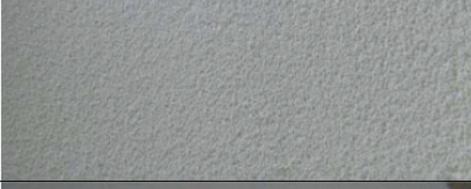
Symbol	Description	Sufficient quality for 3D printing?	Example
	no coherent powder bed	No	
	coherent powder bed with big grooves	No	
	coherent powder bed with small unevenness	No	
	coherent powder bed without any unevenness but rough surface	Yes	
	coherent powder bed with smooth and homogenous surface	Yes	

Tabla 4. Criterios de evaluación de calidad de la superficie de la cama de polvo (Spath et al., 2014).

Con base en los resultados reportados en Spath et al. se concluye que el mecanismo que en general produce camas de polvo con mejor calidad es el del tipo rodillo a contra rotación (Tabla 5).

	FiB	FiR	RotR
Raw HA			
<32			
32-45			
45-63			
63-80			
80-100			
100-125			
>125			
EG			
>125+15%			
>125+25%			

Tabla 5. Resultados cualitativos de las pruebas de deposición de material en polvo (Spath et al., 2014).

3.8. Velocidad transversal del mecanismo de deposición de material en polvo

En Chen et al se reporta un estudio experimental y numérico de los efectos de la velocidad transversal de un mecanismo de deposición en forma de rodillo a contra rotación en la rugosidad de la cama de polvo. El mecanismo de deposición consistió en un cilindro de 10 milímetros de diámetro y 0.8 micrómetros de rugosidad, girando a una velocidad angular de 2π rad/s (Figura 22), depositando partículas esféricas de polvo de acero inoxidable 316L (Figura 23) en 100 micrómetros de espesor de capa. La rugosidad en la cama se midió con un perfilómetro láser KEYENCE LJV7020 en una serie de zonas de 8 X 8 milímetros (Chen et al., 2020).

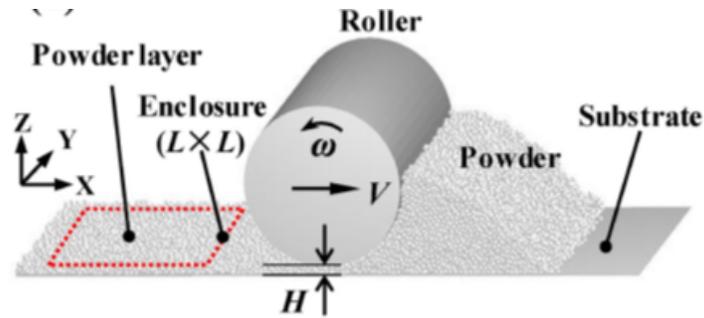


Figura 22. Esquema del mecanismo de deposición de polvo en forma de rodillo a contra rotación utilizado en el análisis experimental y de las zonas en las que se midió la rugosidad (Chen et al., 2020).

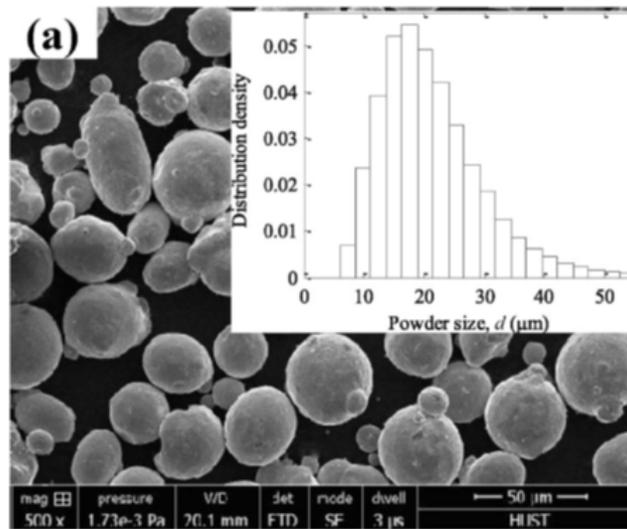


Figura 23. Distribución estadística de tamaños de partícula e imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM) del polvo de acero inoxidable 316L empleado (Chen et al., 2020).

En los resultados reportados en Chen et al se detecta que la rugosidad en la cama de polvo aumenta conforme se incrementa la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo (Figura 24), esto se debe a que las partículas son sometidas a una fuerza de arrastre mayor lo cual les dificulta asentarse en los huecos de la cama de polvo por lo que se obtiene como resultado una cama poco compacta y con picos y valles pronunciados (Chen et al., 2020).

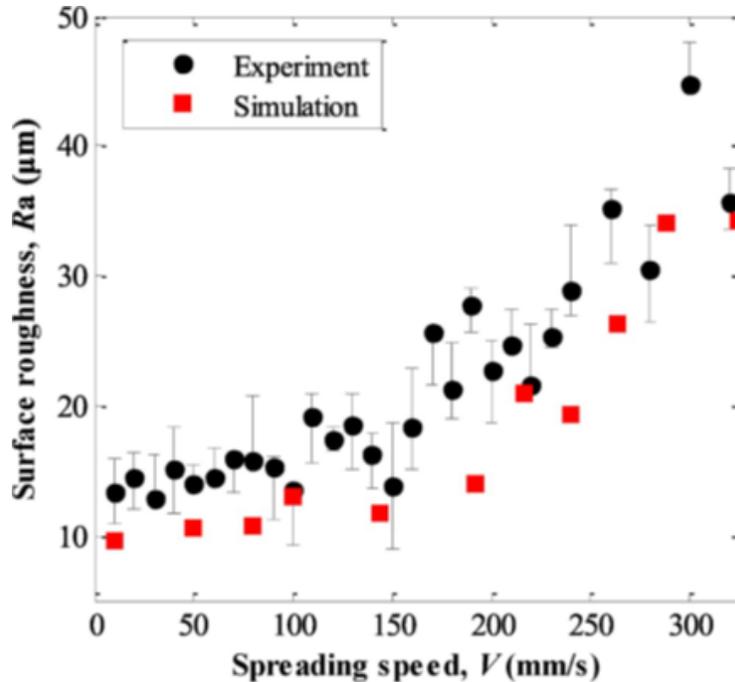


Figura 24. Variación de la rugosidad R_a en la cama de polvo con respecto a la velocidad transversal de mecanismo de deposición de polvo (Chen et al., 2020).

3.9. Estrategia de escaneo

En Miyanaji et al. se reporta la construcción de lotes de probetas cúbicas para evaluar la correlación cualitativa y cuantitativa entre las características del material en polvo y la calidad de las construcciones incluyendo la rugosidad, exactitud dimensional y resistencia mecánica siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.1.2.

En los resultados reportados en Miyanaji et al se observa que si se utiliza una estrategia de escaneo del tipo *raster* en donde se depositen líneas rectas paralelas de aglutinante para la construcción completa de la geometría de la capa se obtendrá un *stairstepping effect* en los bordes laterales perpendiculares a la orientación de las líneas de escaneo y un perfil corrugado en esta misma dirección sobre las superficies horizontales paralelas a la plataforma de construcción debido a la coalescencia entre gotas dentro de una misma línea de escaneo (Figura 25). Por lo tanto, la estrategia de escaneo del tipo *raster* generará variaciones direccionales de la rugosidad (Figura 26) (Miyanaji et al., 2019).

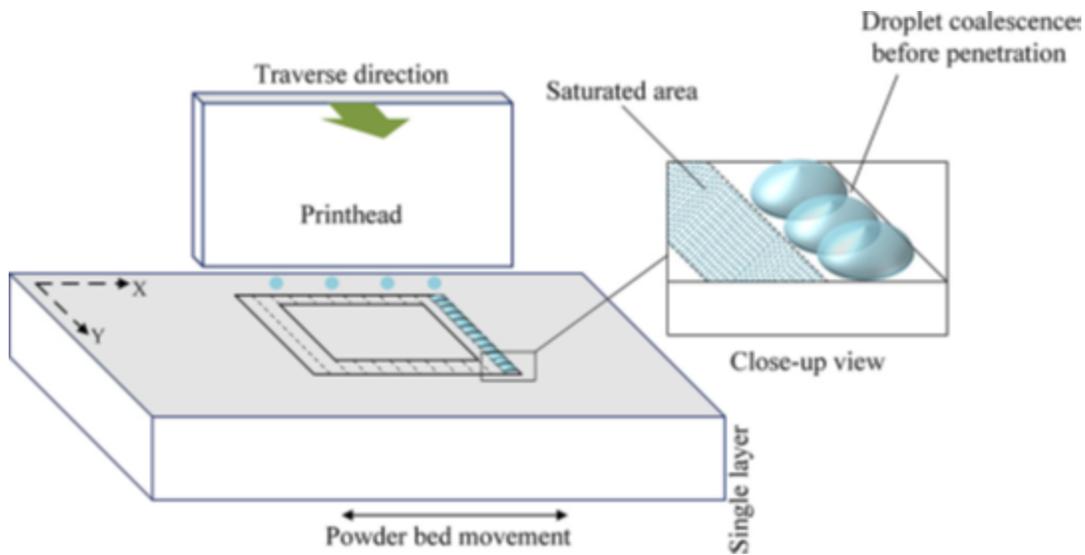


Figura 25. Esquema de la formación de una línea de escaneo en el proceso de Binder Jetting (Miyajima et al., 2019).

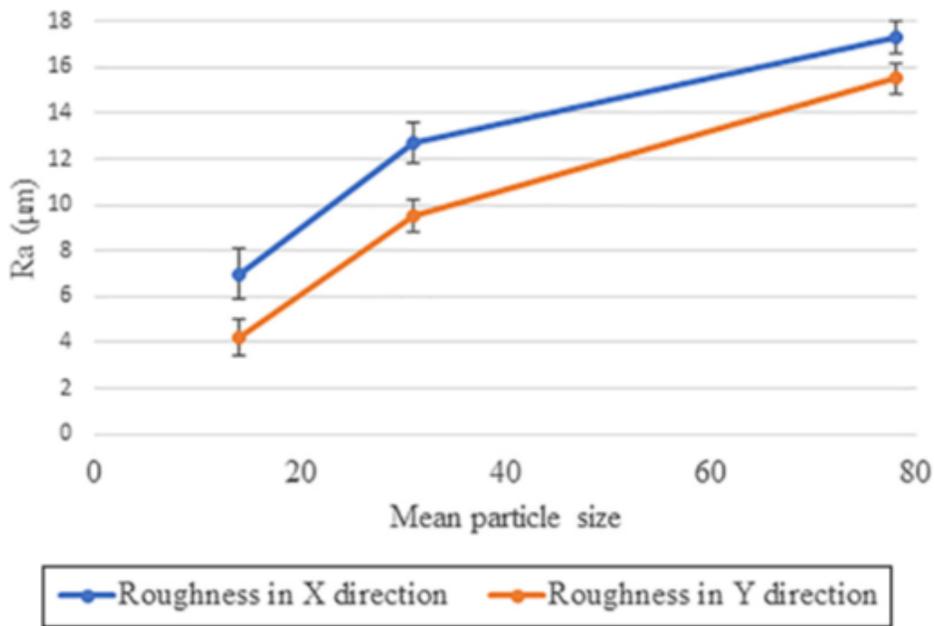


Figura 26. Evidencia de la variación direccional en la Rugosidad Ra en diferentes direcciones sobre el plano XY de tres muestras fabricadas por la máquina ExOne MLab (Miyajima et al., 2019).

3.10. Orientación de las superficies

En Myers et al se reporta la construcción de una serie de probetas con el fin de cuantificar las relaciones entre diferentes variables, entre ellas la velocidad transversal

de deposición del material en polvo, el tamaño de gota de aglutinante, la rugosidad y la orientación de la superficie con respecto a la dirección de deposición de capas siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.2. Con base en los resultados reportados en Myers et al. se observa que aquellas caras o superficies con mayor ángulo de inclinación con respecto a la dirección de deposición de las capas de material en polvo son las que presentan mayor rugosidad (Figura 27) (Myers et al., 2021).

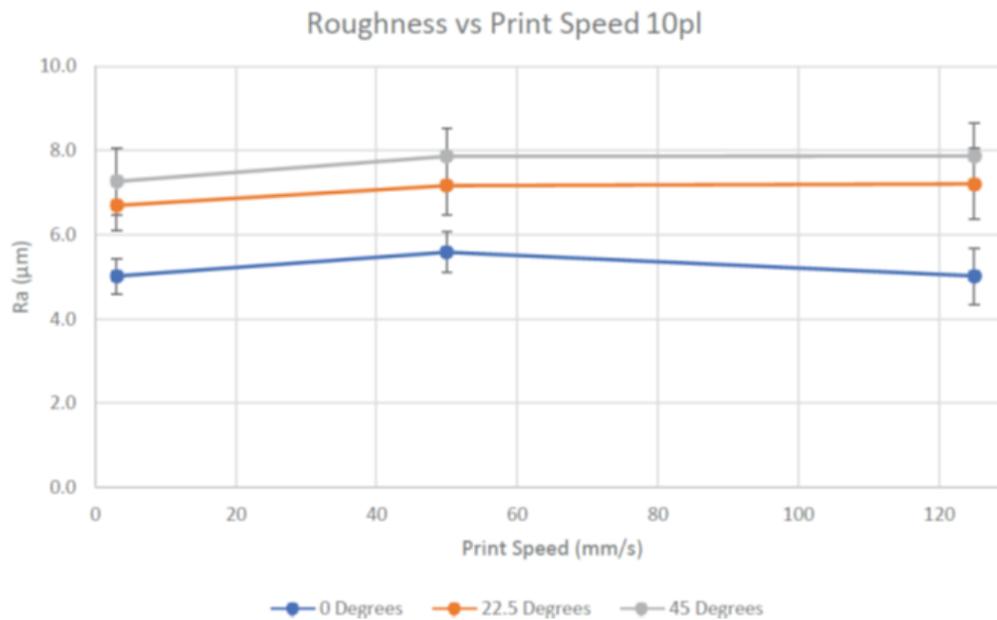


Figura 27. Relación experimental entre la velocidad transversal del mecanismo de deposición del material en polvo, la orientación de construcción y la rugosidad Ra en la cara lateral de probetas fabricadas por el proceso de Binder Jetting. Se puede observar que a mayor el ángulo de inclinación mayor es la rugosidad en su superficie (Myers et al., 2021).

3.11. Número de capas de la construcción

En Colton et al. se reporta la construcción con una máquina de *Binder Jetting* personalizada una serie de probetas planas rectangulares y midió la rugosidad en las caras superiores paralelas a la plataforma de construcción para evaluar el cambio en la rugosidad en las superficies horizontales paralelas a la plataforma de fabricación de las probetas con respecto a un conjunto de variables del proceso. Las dimensiones de las probetas fueron de 10 X 7.5 mm y se modificó tanto el espesor de capa utilizado (35, 50 y 65 micrómetros) como el número de capas que conformaron a cada probeta (1, 2, 3, 5 y 8). También, se utilizaron diferentes frecuencias de depósito de gotas (500 Hz y 1 kHz), distancia entre gotas de aglutinante (40, 50 y 60 micrómetros) y distancia entre líneas de escaneo, siendo esta última del mismo valor que la distancia entre gotas de

aglutinante empleada para cada probeta. En cuanto a las características relacionadas con el aglutinante se utilizaron gotas de 44 micrómetros de diámetro (45 pL de volumen) del aglutinante ExOne con densidad de 1.05 g/cm³, viscosidad de 4.6 cps y tensión superficial de 32 din/cm, a una velocidad de gota de 4.9 m/s. El material en polvo empleado fue acero inoxidable ExOne 316 con un tamaño de partícula $D_{50} = 10$ micrómetros (Figura 28), procesado en condiciones ambientales (humedad: ~30%, temperatura: 21 °C) y sin calentar la cama de polvo entre cada deposición de capa. Al finalizar la construcción de cada grupo de probetas se sometió la cama de polvo a una temperatura de 180 °C durante 1 hora. Posteriormente se dejó enfriar la cama y se midió la rugosidad paralela a la plataforma de construcción en dos o tres probetas de cada combinación de parámetros mediante un perfilómetro 3D Zeta 20 (Colton et al., 2021).

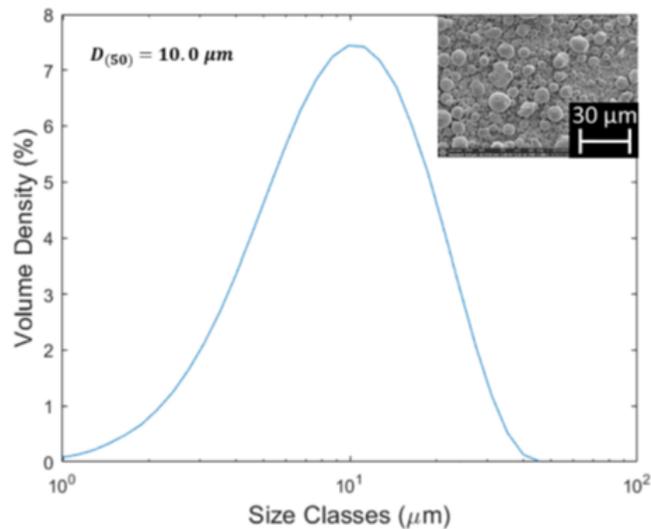


Figura 28. Distribución de tamaños de partículas e imagen tomada por microscopía electrónica de barrido (SEM) del polvo de acero inoxidable ExOne 316 utilizado para la construcción de las probetas (Colton et al., 2021).

Con base en los resultados reportados en Colton et al. se concluye que en aquellas piezas o elementos con altura de construcción muy pequeña y cercana o apoyada sobre la plataforma de construcción se obtiene una mayor rugosidad en las superficies horizontales paralelas a la plataforma de fabricación si se emplean solamente una o dos capas para la formación de la geometría a comparación de si se emplean 5 o más capas, esto se debe a la fuerza resultante del impacto de las gotas de aglutinante sobre la cama de polvo lo cual provoca que el polvo se reacomode o se disperse mediante el efecto conocido como *spattering* o eyección balística, aunque también puede deberse al *balling effect* o formación de aglomeraciones de polvo generado por distanciamiento insuficiente entre gotas o cuando la distancia entre gotas es cercana al diámetro de la

gota (Figura 27, curvas a y b). Sin embargo, conforme se depositan mayor número de capas la rugosidad va disminuyendo hasta alcanzar valores similares a la rugosidad inicial de la plataforma de construcción cuando se deposita la quinta capa, esto se debe a que el aglutinante en la cama de polvo crea fuerzas capilares de cohesión que alteran el comportamiento mecánico del polvo al momento en el que la gota de aglutinante impacta la cama de polvo. La velocidad con la que disminuye la rugosidad aumenta conforme se incrementa el espesor de capa (Figura 29, curvas c y d), esto debido a que el aglutinante cuenta con mayor espacio para penetrar en la cama de polvo lo cual disminuye la dispersión lateral del aglutinante haciendo menos propensa la presencia del *balling effect* (Colton et al., 2021).

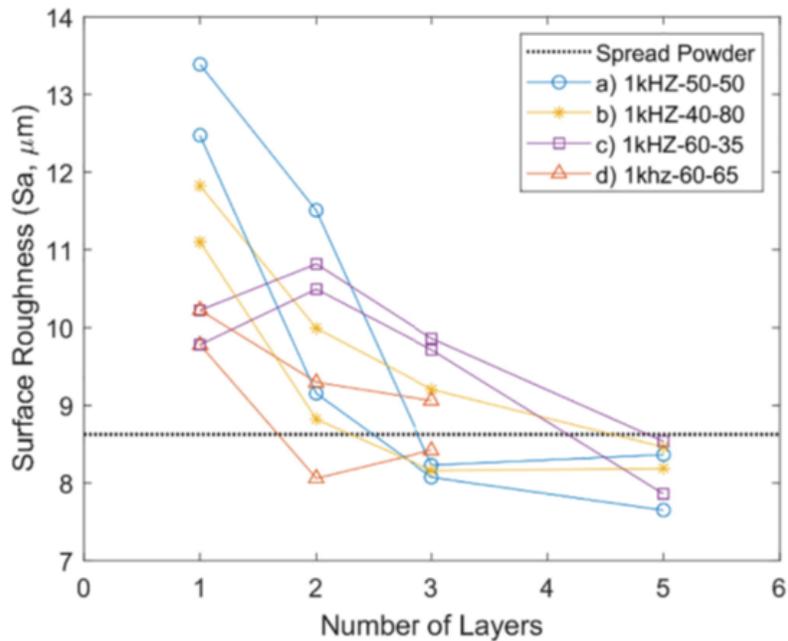


Figura 29. Rugosidad S_a de las probetas planas fabricadas con diferente cantidad de capas y bajo diferentes parámetros de proceso. El cuadro de texto denota los parámetros de proceso en el siguiente orden: frecuencia de depósito de gotas, distancia entre gotas/líneas de escaneo, espesor de capa (Colton et al., 2021).

3.12. Post proceso de sinterizado

En Miyajiri et al. se reporta la construcción de lotes de probetas cúbicas para evaluar la correlación cualitativa y cuantitativa entre las características del material en polvo y la calidad de las construcciones incluyendo la rugosidad, exactitud dimensional y resistencia mecánica siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.1.2.

Paralelamente, en Miyajiri et al se reporta la construcción de 8 cubos más con los insumos y parámetros descritos en la sección 3.1.2 para su posterior sinterización en

atmósfera de argón en tres etapas: la primera para la remoción del aglutinante con duración de una hora a 500 °C con una tasa de calentamiento de 20 °C/min, la segunda de sinterización con una duración de 90 minutos a 1300 °C con una tasa de calentamiento de 10 °C/min y la tercera una etapa de enfriamiento natural hasta llegar a la temperatura ambiente. Posteriormente, se midió la rugosidad en los cubos en la dirección de depósito de aglutinante y dirección normal al depósito de aglutinante (direcciones Y y X respectivamente como se ilustran en la Figura 8) bajo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.1.2.

En los resultados descritos en Miyanaji et al se observa que si bien el proceso de sinterizado redujo la rugosidad en las probetas las relaciones y diferencias entre rugosidad, tamaño medio de partícula y dirección se mantuvieron presentes (Figura 30). La disminución en la rugosidad después del sinterizado fue mayor en las probetas con tamaño medio de partícula más pequeño debido a que las partículas más pequeñas tienen mayor energía de superficie y, por lo tanto, una cinética de sinterización más fuerte (Miyanaji et al., 2019).

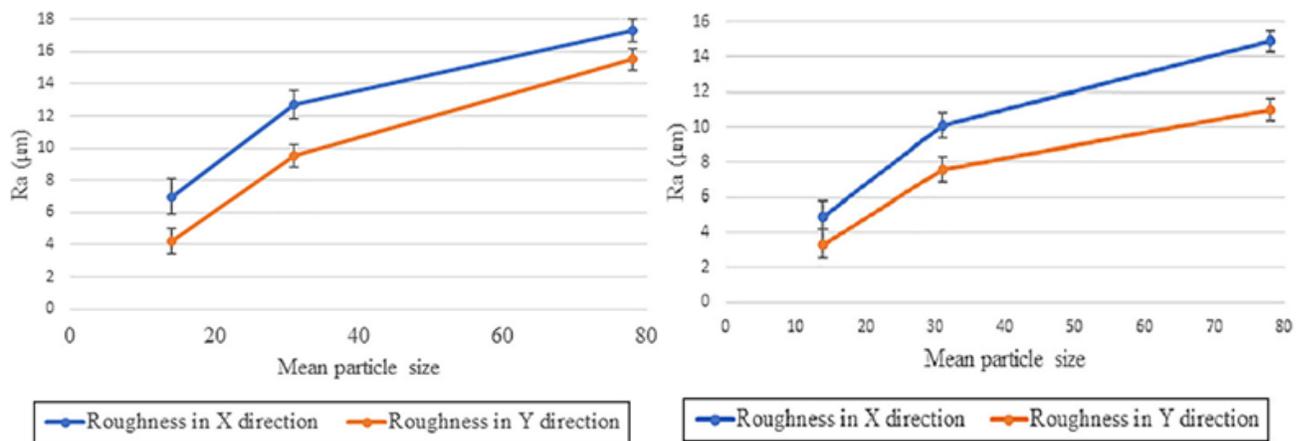


Figura 30. Relación experimental entre la rugosidad Ra en diferentes direcciones y el tamaño medio de partícula. A la izquierda, rugosidad antes del sinterizado, y a la derecha, rugosidad después del sinterizado (Miyanaji et al., 2019).

4. Recomendaciones para minimizar la transición entre técnicas de construcción

Recomendaciones orientadas a las características del material

I. Disminuir el tamaño medio de partícula de polvo

Si se disminuye el tamaño medio de partícula de la distribución de tamaños de partículas de polvo utilizado para la fabricación de la pieza, la rugosidad se reduce.

En los resultados obtenidos por Miyajima se observa que al disminuir el tamaño medio de partícula desde un valor de 78 micrómetros a un valor de 14 micrómetros la rugosidad Ra se reduce desde un valor de 15 micrómetros a un valor de 4 micrómetros lo cual representa una reducción de 73.33%.

II. Aumentar la amplitud de la distribución estadística de tamaños de partícula

Si se hace más grande el intervalo de valores de la distribución de tamaños de partícula para que abarque un mayor número de tamaños de partícula se aumenta la densidad de compactación del polvo sobre la cama y se disminuye la rugosidad.

Con base en los resultados obtenidos por Miyajima et al, con una distribución de tamaños de partícula con intervalo de 5-25 micrómetros se obtiene una densidad de compactación de 51% mientras que con un intervalo más amplio de 44-106 micrómetros se obtuvo una densidad de compactación de 61% lo cual representa un incremento del 10% en la densidad de compactación. Este incremento de alrededor del 10% en la densidad de compactación representa una disminución de 43.47% en la rugosidad como lo observó Chen et al en su análisis experimental en donde al incrementar de un 32% a un 43% la densidad de compactación el valor de rugosidad Ra en la cama de polvo disminuyó de 23 micrómetros a 13 micrómetros.

Recomendaciones orientadas a los parámetros del proceso

I. Disminuir la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo

Si se disminuye la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo se da tiempo a que las partículas del material en polvo se acomoden sobre los espacios intersticiales de la cama y, por lo tanto, que haya menos huecos superficiales que representen diferencias entre crestas y valles más pronunciadas que aumenten la rugosidad.

En los resultados del estudio de Chen et al se puede observar que si se disminuye la velocidad transversal del rodillo a contra rotación de 300 mm/s a 50 mm/s la rugosidad

Ra de la cama de polvo disminuye desde un valor de 45 micrómetros hasta un valor de 13 micrómetros representando una reducción de 71.11%.

II. Modificar la orientación y ubicación de la pieza sobre la plataforma y volumen de fabricación

Si se reacomoda la pieza que se desea construir sobre la plataforma de construcción tanto en orientación como en ubicación de tal manera que se hagan coincidir la mayor cantidad de sus superficies con orientaciones que produzcan menor rugosidad se disminuye la rugosidad en algunas superficies de la pieza y disminuyen los requisitos de ajuste de rugosidad mediante post procesos.

Con base en las condiciones experimentales y resultados obtenidos por Myers et al, si se reduce el ángulo de inclinación de una superficie de 45° a 22.5° con respecto a la dirección de deposición de las capas de material en polvo manteniendo constantes los demás parámetros de proceso el valor de rugosidad Ra en dicha superficie puede reducirse de 7.27 micrómetros a 6.70 micrómetros lo que representa una reducción del 7.84%, mientras que si dicho ángulo se reduce hasta 0° la rugosidad Ra puede disminuir hasta un valor de 5.02 micrómetros lo cual representa una reducción de 30.94%. Las reducciones porcentuales en rugosidad se acentúan aún más si se aumenta la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo de 3 mm/s a 125 mm/s en donde se observó que al reducir el ángulo de inclinación desde un ángulo de 45° hasta 0° la rugosidad disminuyó de 7.87 micrómetros a 5.02 micrómetros representando una disminución de 36.21%.

III. Modificar el tamaño de gota de aglutinante

Cuando se modifica el tamaño de gota de aglutinante se está alterando la interacción entre la gota y la cama de polvo, principalmente los fenómenos ocurridos durante el impacto de la gota con la cama (*splashing, spattering*) que son los que influyen más en la rugosidad en la cama de polvo y de las piezas que se construyan, y la dinámica de esparcimiento y penetración de la gota en la cama de polvo.

Si se usa una velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo baja se debe de aumentar el tamaño de gota para disminuir la rugosidad, esto se vio reflejado en los resultados obtenidos por Myers et al en donde a una velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo de 3 mm/s al aumentar el tamaño de gota desde 10 pL a 30 pL la rugosidad Ra en la probeta orientada a 0° disminuyó desde un valor de 5 micrómetros hacia un valor de 4 micrómetros, representando una reducción del 20%.

Por otra parte, si se trabaja con velocidades más altas se debe disminuir el tamaño de gota para disminuir la rugosidad, esto lo pudo observar Myers et al al emplear una

velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo de 125 mm/s y disminuir el tamaño de gota de aglutinante desde 30 pL hasta 10 pL la rugosidad Ra en la probeta orientada a 22.5° disminuyó desde 9.78 micrómetros hasta 7.21 micrómetros lo cual representa una reducción del 26.27%.

IV. Usar un mecanismo de deposición de polvo del tipo rodillo a contra rotación

En cualquier proceso de manufactura aditiva basado en cama de polvo es conveniente utilizar un mecanismo de deposición de polvo en forma de rodillo a contra rotación ya que es el tipo de mecanismo con el que se obtienen propiedades de la cama más favorables para la reducción de defectos en la pieza que se desee fabricar, además de que se evitan las variaciones espaciales en la rugosidad en la cama de polvo provocados por otro tipo de mecanismos como el de cuchilla.

V. Usar una estrategia de escaneo del tipo vector para la definición de los contornos de la pieza y el tipo raster para la construcción interna de la pieza

Con este tipo de estrategia de escaneo se trazan los contornos de las geometrías de cada capa y se utilizan todas las boquillas disponibles para la construcción interna de las geometrías, mediante esta estrategia se evita el *stairstepping effect* direccional horizontal en los bordes laterales de las capas y de las piezas que se fabriquen y se reducen las ondulaciones o textura corrugada sobre las superficies horizontales de la pieza.

Recomendaciones orientadas al diseño

I. Aumentar la altura de construcción de aquellos elementos de la pieza paralelos al plano horizontal cercanos o apoyados sobre la plataforma de construcción contruidos con menos de 5 capas de material en polvo

Si se modifica la altura de construcción de los elementos de la pieza paralelos al plano horizontal cercanos o apoyados sobre la plataforma de construcción de tal manera que su construcción pueda ser concretada por 5 o más capas de material en polvo se da tiempo para que el aglutinante altere el comportamiento mecánico de la cama de polvo y se minimice el *spattering effect* ocasionado por el impacto de las gotas de aglutinante con la cama reflejándose en una reducción en la rugosidad en la cama.

Con base en las condiciones experimentales y resultados obtenidos por Colton et al, bajo frecuencia de alimentación de gotas de 1 kHz y espaciado entre gotas, líneas de escaneo y espesor de capa similares al tamaño de gota, si se aumenta la altura de construcción del elemento para que el número de capas de material en polvo aumente

de 1 a 5 capas el valor de rugosidad S_a en el plano horizontal disminuye de 13.5 micrómetros a 8.3 micrómetros lo cual representa una disminución de 38.51%.

II. Rediseñar la pieza modificando la orientación de las superficies de la pieza a fabricar

Si se rediseña la pieza que se desea fabricar de tal manera que se disminuya el ángulo de inclinación de sus superficies con respecto a la dirección de deposición de las capas de material en polvo apuntando a que la mayoría de sus superficies, o idealmente la totalidad de ellas, se construyan en la orientación de menor rugosidad se puede reducir la migración entre estrategias de construcción.

Con base en las condiciones experimentales y resultados obtenidos por Myers et al, si se reduce el ángulo de inclinación de una superficie con respecto a la dirección de deposición de las capas de material en polvo de 45° a 22.5° manteniendo constantes los demás parámetros de proceso el valor de rugosidad R_a en dicha superficie puede reducirse de 7.27 micrómetros a 6.70 micrómetros lo que representa una reducción del 7.84%, mientras que si dicho ángulo se reduce hasta 0° la rugosidad R_a puede disminuir hasta un valor de 5.02 micrómetros lo cual representa una reducción de 30.94%. Las reducciones porcentuales en rugosidad se acentúan aún más si se aumenta la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo de 3 mm/s a 125 mm/s en donde se observó que al reducir el ángulo de inclinación desde un ángulo de 45° hasta 0° la rugosidad disminuyó de 7.87 micrómetros a 5.02 micrómetros representando una disminución de 36.21%.

III. Ajustar las dimensiones de la pieza

Para el caso de ensambles, se puede ajustar el valor nominal de la dimensión o dimensiones de la pieza restando la desviación excesiva ocasionada por el valor de rugosidad obtenido por el proceso de tal manera que el acoplamiento entre piezas y elementos pueda darse de manera adecuada y acorde a la funcionalidad requerida.

En la Tabla 6 se recopilan a manera de resumen las recomendaciones propuestas anteriormente.

Tabla 6. Recomendaciones para minimizar la transición entre técnicas de construcción.

Recomendaciones orientadas a las características del material			
Número de recomendación	Recomendación propuesta	Modificación realizada	Cambio en la rugosidad reportada (disminución porcentual de la rugosidad)
I	Disminuir el tamaño medio de partícula de polvo	Tamaño medio: 78 μm -> 14 μm	Ra: 15 μm -> 4 μm (73.33%)
II	Aumentar la amplitud de la distribución estadística de tamaño de partícula	Intervalo de tamaño de partículas: 5-25 μm -> 44-106 μm	Ra: 23 μm -> 13 μm (43.47%)
Recomendaciones orientadas a los parámetros del proceso			
Número de recomendación	Recomendación propuesta	Modificación realizada	Cambio en la rugosidad reportada (disminución porcentual de la rugosidad)
I	Disminuir la velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo	Velocidad deposición del polvo: 300 mm/s -> 50 mm/s	Ra: 45 μm -> 13 μm (71.11%)
II	Modificar la orientación y ubicación de la pieza sobre la plataforma y volumen de fabricación.	Ángulo de inclinación de la pared: 45° -> 0°	Ra: 7.87 μm -> 5.02 μm (36.21%)
III	Modificar el tamaño de gota de aglutinante	Tamaño de gota: 30 pL -> 10 pL	Ra: 9.78 μm -> 7.21 μm (26.27%)

IV	Usar un mecanismo de deposición de polvo del tipo rodillo a contra rotación.	No cuantificado	No cuantificado
V	Usar una estrategia de escaneo del tipo <i>vector</i> para la definición de los contornos de la pieza y el tipo <i>raster</i> para la construcción interna de la pieza.	No cuantificado	No cuantificado
Recomendaciones orientadas al diseño			
Número de recomendación	Recomendación propuesta	Modificación realizada	Cambio en la rugosidad reportada (disminución porcentual de la rugosidad)
I	Aumentar la altura de construcción de elementos paralelos al plano horizontal cercanos o apoyados sobre la plataforma de construcción construidos con menos de 5 capas de material en polvo.	Altura de construcción: 50 μm (1 capa de 50 μm de espesor) -> 250 μm (5 capas de 50 μm de espesor)	Sa: 13.5 μm -> 8.3 μm (38.51%)
II	Rediseñar la pieza modificando la orientación de las superficies de la pieza a fabricar.	Ángulo de inclinación de la pared: 45° -> 0°	Ra: 7.87 μm -> 5.02 μm (36.21%)
III	Ajustar las dimensiones de la pieza.	No cuantificado	No cuantificado

5. Conclusiones

El impacto de los eventos disruptivos, como la pandemia de CoViD-19, evidenciaron la necesidad de las industrias de desarrollar capacidades resilientes con miras a en el futuro ser capaces de recuperarse en el menor tiempo posible de las crisis que ocurran, esto se puede lograr aumentando la adaptabilidad de los sistemas de manufactura.

La manufactura aditiva cuya mayor libertad geométrica con respecto a la manufacturas conformacional y sustractiva, su poca dependencia de herramientas y herramientas, sus características digitales y la creciente gama de materiales que puede procesar (metales, cerámicos, polímeros, compuestos) podría ayudar a potenciar la adaptabilidad y, por lo tanto, la resiliencia de los sistemas de manufactura, sin embargo, al ser un proceso emergente en etapas tempranas de adopción tecnológica se requieren guías que tomen en cuenta sus limitaciones constructivas para dirigir las decisiones gerenciales de producción, facilitar su integración en los sistemas de manufactura y habilitar sus capacidades resilientes, estos dos últimos aspectos se ven favorecidos si se buscan las condiciones en las que se minimice la transición entre técnicas de construcción.

El proceso de manufactura aditiva *Binder Jetting* tiene un alto potencial de implementación a escala industrial en un futuro cercano, sin embargo, sus características no le permiten alcanzar valores de rugosidad tan bajos como los obtenidos por otras técnicas como la sustractiva.

Al estudiar la rugosidad de este proceso de manufactura aditiva se identificó que existen condiciones relacionadas con los parámetros de proceso, las características del material y la geometría de la pieza a fabricar que permiten reducir la rugosidad de las piezas que se desean fabricar para obtener valores similares a los obtenidos por métodos sustractivos. Tal es el caso del parámetro de velocidad transversal del mecanismo de deposición de polvo que al disminuirse se han observado reducciones en la rugosidad de hasta 71.11%, o de la orientación y ubicación de la pieza en donde al hacer coincidir la mayor cantidad de superficies con un ángulo de inclinación de 0° se obtuvieron reducciones en la rugosidad de hasta un 36.11%. También se ha reportado que al modificar el tamaño de gota del aglutinante se observan disminuciones en la rugosidad de hasta un 26.27%.

En cuanto a las características del material que se identificaron durante el estudio que permiten disminuir la rugosidad de la pieza a fabricar se encontró reportado que al disminuir el tamaño medio de las partículas de material en polvo se observan reducciones en la rugosidad de hasta 73.33%, o si se aumenta la amplitud de la distribución estadística de tamaños de partículas de polvo se ha reportado que se pueden alcanzar reducciones de hasta 43.47% en la rugosidad.

De la misma forma, se encontraron reportadas algunas condiciones relacionadas con el diseño de la pieza que favorecen la reducción de la rugosidad, tal es el caso de la altura de construcción de elementos paralelos al plano horizontal cercanos o apoyados sobre la plataforma de construcción contruídos con menos de 5 capas de material en polvo en donde si se aumenta dicha altura de tal manera que se empleen al menos 5 capas de material en polvo para su construcción se reporta que la rugosidad puede disminuir hasta en un 38.51%, o si se rediseña la pieza a fabricar de tal manera la mayor cantidad de superficies coincida con un ángulo de inclinación de 0° durante su fabricación se observó que se pueden obtener reducciones en la rugosidad de hasta un 36.11%.

Con base en el estudio de la rugosidad realizado se propusieron recomendaciones que si se toman como base para guiar las decisiones de producción en condiciones resilientes se puede reducir la dependencia y migración hacia otros procesos para cumplir con los valores de rugosidad deseados en la pieza que se desee fabricar, sin embargo, la viabilidad de aplicación de cada una de estas recomendaciones dependerá de las condiciones y necesidades de las industrias en donde se aplicarán y de las condiciones de mercado de tal manera que la implementación de una o más de las recomendaciones conduzcan a una solución satisfactoria en términos de costos y de valores de rugosidad de las piezas fabricadas.

El proceso de *Binder Jetting*, al igual que los otros procesos de manufactura aditiva, se encuentran en etapas intermedias de desarrollo tecnológico por lo que todavía se requiere conocer más a detalle el comportamiento de los procesos relacionando los parámetros de proceso y las características del material con la calidad obtenida en las construcciones ejecutadas, así como entender a profundidad los principios físicos con los que operan. Por esta razón, actualmente solo es posible establecer criterios parciales para guiar las decisiones de producción usando dichas tecnologías en condiciones resilientes.

Referencias

Ali, U.; Mahmoodkhani, Y.; Shahabad, S. I.; Esmaeilzadeh, R.; Liravi, F.; Sheydaeian, E.; Huang, K. Y.; Marzbanrad, E.; Vlasea, M.; Toyserkani, E., *On the measurement of relative powder compaction density in powder-bed additive manufacturing processes*, Materials & Design, Volume 155, 2018, Pages 495-501, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.030>.

Bhushan, B., *Surface roughness analysis and measurement techniques*, Modern tribology handbook, two volume set (pp. 79-150). CRC press, 2000.

Chen, H.; Chen, Y.; Liu, Y.; Wei, Q.; Shi, Y.; Yan, W., *Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additive manufacturing*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 153, 2020, 103553, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103553>.

Chen, H.; Wei, Q.; Wen, S.; Li, Z.; Shi, Y., *Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting: Numerical modeling and experimental verification based on discrete element method*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 123, 2017, Pages 146-159, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.08.004>.

Cima, M. J.; Oliveira, M.; Wang, H. R.; Sachs, E.; Holman, R., *Slurry-based 3DP and fine ceramic components*, 2001 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2001, <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/3266>.

Colton, T.; Inkley, C.; Berry, A.; Crane, N. B., *Impact of inkjet printing parameters and environmental conditions on formation of 2D and 3D binder jetting geometries*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 71, 2021, Pages 187-196, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.024>.

Colton, T. & Crane, N. B., *Influence of droplet velocity, spacing, and inter-arrival time on line formation and saturation in binder jet additive manufacturing*, Additive Manufacturing, Volume 37, 2021, 101711, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101711>.

Du, W.; Ren, X.; Pei, Z.; Ma, C., *Ceramic Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review on Density*, ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020; 142(4): 040801, <https://doi.org/10.1115/1.4046248>.

Fan, T., *Droplet-powder impact interaction in three dimensional printing*, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1996, <http://hdl.handle.net/1721.1/10948>.

Fu, X.; Huck, D.; Makein, L.; Armstrong, B.; Willen, U.; Freeman, T., *Effect of particle shape and size on flow properties of lactose powders*, *Particuology*, Volume 10, Issue 2, 2012, Pages 203-208, ISSN 1674-2001, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.11.003>.

Freeman, R., *Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders — A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell*, *Powder Technology*, Volume 174, Issues 1–2, 2007, Pages 25-33, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.10.016>.

Gockel, J.; Sheridan, L.; Koerper, B.; Whip, B., *The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life*, *International Journal of Fatigue*, Volume 124, 2019, Pages 380-388, ISSN 0142-1123, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.03.025>

Haeri, S.; Wang, Y.; Ghita, O.; Sun, J., *Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing*, *Powder Technology*, Volume 306, 2017, Pages 45-54, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.002>.

Jiang, S.; Hu, K.; Zhan, Y.; Zhao, C.; Li, X., *Theoretical and Experimental Investigation on the 3D Surface Roughness of Material Extrusion Additive Manufacturing Products*, *Polymers* 2022, 14, 293, <https://doi.org/10.3390/polym14020293>.

Jiménez, M.; Romero, L.; Domínguez, I. A.; Espinosa, M. D. M.; Domínguez, M., *Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects*, *Complexity*, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.

Kusiak, A., *Universal manufacturing: enablers, properties, and models*, *International Journal of Production Research*, 2021, <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1894370>.

Miyajima, H.; Orth, M.; Akbar, J. M., *Process development for green part printing using binder jetting additive manufacturing*, *Front. Mech. Eng.* **13**, 504–512, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0508-8>.

[Miyajima, H.](#); [Momenzadeh, N.](#); [Yang, L.](#), *Effect of powder characteristics on parts fabricated via binder jetting process*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25 No. 2, pp. 332-342., 2019, <https://doi.org/10.1108/RPJ0320180069>.

Mostafaei, A.; Elliott, A. M.; Barnes, J. E.; Li, F.; Tan, W.; Cramer, C. L.; Nandwana, P.; Chmielus, M., *Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges*, Progress in Materials Science, Volume 119, 2021, 100707, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>.

Myers, K.; Paterson, A.; Iizuka, T.; Klein, A., *The Effect of Print Speed on Surface Roughness and Density Uniformity of Parts Produced Using Binder Jet 3D Printing*, Preprints 2021, 2021010459. <https://doi.org/10.20944/preprints202101.0459.v1>.

OLYMPUS, *Introduction to Surface Roughness Measurement. Roughness measurement guidebook*, Olympus Corporation, 2017.

Podczec, F.; Mia, Y., *The influence of particle size and shape on the angle of internal friction and the flow factor of unlubricated and lubricated powders*, International Journal of Pharmaceutics, Volume 144, Issue 2, 1996, Pages 187-194, ISSN 0378-5173, [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04755-2](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04755-2).

Range, K.; Feuillebois, F., *Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact*, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 203, Issue 1, 1998, Pages 16-30, ISSN 0021-9797, <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5518>.

Rein, M., *Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces*, Fluid Dynamics Research, Volume 12, Issue 2, 1993, Pages 61-93, ISSN 0169-5983, [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(93\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-K).

Simchi, A., *The role of particle size on the laser sintering of iron powder*, Metall Mater Trans B 35, 937–948, 2004, <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0088-3>.

Spath, S.; Seitz, H., *Influence of grain size and grain-size distribution on workability of granules with 3D printing*, Int J Adv Manuf Technol 70, 135–144, 2014, <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5210-8>.

Trauth, D.; Schleifenbaum, J.; Arntz, K.; Lukas, G.; Niemietz, P.; Mayer, J.; Kaufmann, T., *Resilience in supply chains - How additive manufacturing enables a resilient supply chain*, ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing, Germany, 2021, <https://doi.org/10.31224/osf.io/52f38>.

Weichhart, G.; Mangler, J.; Raschendorfer, A.; et al., *An adaptive system-of-systems approach for resilient manufacturing*, Elektrotech. Inftech. 138, 341–348, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00502021009122>.

Ziaee, M.; Crane, N. B., *Binder jetting: A review of process, materials, and methods*, Additive Manufacturing, Volume 28, 2019, Pages 781-801, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.

Zhou, Z.; Mitchell, C. A.; Buchanan, F. J.; Dunne, N. J., *Effects of heat treatment on the mechanical and degradation properties of 3D-printed calcium-sulphate-based scaffolds*, ISRN Biomater 2013;2013:1–10, 2013, <https://doi.org/10.5402/2013/750720>.