

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas



“Caracterización y estudio del efecto de la geometría de una tobera de Laval en el proceso de Cold Spray”

Tesis que para obtener el título de:

Ingeniero Aeroespacial

Presenta

Rodrigo González Mejía

Director de tesis:

Dr. Juan Antonio Ruiz Ochoa

Codirector de tesis:

Dra. Maricruz Hernández Hernández

Tijuana, Baja California

Abril, 2022

Dedicatoria

Este trabajo es resultado de esfuerzos realizados por un servidor, así como de personas que estimo y admiro; desde el esfuerzo hecho con mucho amor por mis padres, quienes con cariño y dedicación me han apoyado de forma incondicional, ellos quienes han consagrado parte de su vida a sacar adelante a sus hijos, con pujante valor; ellos que me han enseñado lo bonito que es la vida.

A mis padres Sofía y Alberto; mis hermanos Diego y Jesús; familia y seres queridos.

A mi Nina Angie por su apoyo y cariño.

A Mariana y nuestro infinito amor.

Agradecimientos

Palabras faltan para agradecer todo el apoyo que he recibido de las personas que me han apoyado incondicionalmente y que han hecho posible este trabajo, quienes me han ayudado a llegar a este punto de mi vida, con quienes siempre puedo contar.

Especialmente quiero agradecer a mi asesora, la Dra. Maricruz Hernández Hernández, a quien estimo y agradezco por todo su apoyo y comprensión para realizar este trabajo, porque desinteresadamente me tendió la mano y me dio su consejo cuando más lo necesité, porque alienta a sus estudiantes a ser mejores personas y estimula nuestro desarrollo profesional.

Agradezco a mi asesor, el Dr. Juan Antonio Ruiz Ochoa, de quien he recibido todo su apoyo para realizar y gestionar este trabajo desde mi alma máter.

Agradezco el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto de CB A1-S-23339.

Agradezco al Dr. Juan Muñoz Saldaña, responsable técnico del Laboratorio Nacional de Proyección Térmica (CENAPROT), por brindarme su apoyo y permitirme el acceso a este laboratorio que dirige, para poder desarrollar la parte experimental de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de CENAPROT que amablemente me ayudaron y me permitieron aprender a su lado.

Nomenclatura

A^*	Área de la sección transversal de la boquilla en la garganta [m^2]
A	Área en una sección transversal de la boquilla [m^2]
A_e	Área de la sección transversal a la salida de la boquilla [m^2]
a	Velocidad del sonido [m/s]
f	Fracción de volumen de porosidad
C_D	Coefficiente de fricción
C_p	Calor específico de un gas a presión constante [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
C_v	Calor específico de un gas a volumen constante [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
D^*	Diámetro en la garganta de la boquilla [m]
D_e	Diámetro a la salida de la boquilla [m]
dp	Diámetro de la partícula [m]
H	Entalpía [J]
h	Espesor del recubrimiento [m]
L	Longitud de la boquilla [m]
Ma	Numero de Mach
m	Flujo masico [$kg \cdot hr^{-1}$]
m_p	Masa de la partícula [kg]
p^*	Presión del gas en la garganta de la boquilla [Pa]
P_0	Presión de estancamiento del gas [Pa]
P	Presión del gas [Pa]
Q	Cantidad de calor transferido [J]
R	Constante de los gases ideales [$J/(mol \cdot K)$]
Re	Numero de Reynolds
S	Entropía [$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$]
T^*	Temperatura del gas en la garganta de la boquilla [$^{\circ}C$]
T_0	Temperatura de estancamiento del gas [$^{\circ}C$]
T	Temperatura del gas [$^{\circ}C$]
T_p	Temperatura de la partícula [$^{\circ}C$]
t	Tiempo [hr, min, s]
U	Energía interna del sistema [J]
u^*	Velocidad del gas en la garganta de la boquilla [m/s]
v_{cr}	Velocidad critica de las partículas [m/s]
v_g	Velocidad del gas [m/s]
v_p	Velocidad de las partículas [m/s]
V	Volumen [m^3]
x	Distancia [m]

γ	Relación de calores específicos
μ_g	Viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]
ρ^*	Densidad del gas en la garganta de la boquilla [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_0	Densidad de estancamiento del gas [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ	Densidad [$kg \cdot m^{-3}$]

Contenido

Dedicatoria	2
Agradecimientos	2
Nomenclatura.....	3
Introducción	8
Planteamiento del problema	10
Hipótesis.....	10
Objetivo General	10
Objetivos específicos.....	10
Manufactura avanzada y el valor agregado a la manufactura mexicana.	11
Procesos de proyección térmica, un campo con potencial de alto valor agregado en México.....	11
Clasificación de los procesos de Proyección Térmica	14
Flame Spraying (Proyección por flama)	15
Arc Spraying (AS).....	16
High velocity oxi-fuel (HVOF) – High velocity air-fuel	16
HVOF Spraying.....	17
D-gun.....	17
Atmospheric Plasma Spraying (APS)	18
Low-Pressure Plasma Spraying (LPPS).....	19
Cold Spray (CS)	21
Historia	21
Principio de funcionamiento del CS	22
Sistemas de CS de alta y baja presión	25
High Pressure Cold Spray (HPCS).....	25
Low Pressure Cold Spray (LPCS)	26
Principio de Funcionamiento del CS.....	28
Mecanismo de adhesión y formación de depósitos	28
Velocidad Crítica.....	29
Ventana de depósito	30
Mapas de selección de parámetros	31
Efectos de los parámetros de procesamiento en la aceleración de las partículas y el proceso de CS	32
Efecto del tamaño de partícula.....	32

Efecto del tipo de gas utilizado	32
Efecto de la temperatura	33
Efecto del diseño de las boquillas	33
Problemas relacionados con la geometría de Laval en el Cold Spray	34
Obstrucción de boquillas (Nozzle clogging)	34
Ondas de choque	36
Ecuaciones y principios gobernantes del proceso de Cold Spray	39
Flujo supersónico	39
Número de Mach	40
Calores específicos	41
Capacidad calorífica	41
Formulación matemática del primer principio de la termodinámica	41
Ecuación de la conservación de la cantidad de momento	42
Flujo Isentrópico.....	43
Relaciones Isentrópicas.....	43
Flujo en una boquilla de Laval (convergente-divergente).....	43
Dinámica de flujo del gas en CS	44
Relaciones críticas dentro de la boquilla de Laval	45
Relación entre Área y Numero de Mach	45
Velocidad de las partículas.....	46
Revisión de la Literatura.....	47
Materiales, Equipos y Métodos.....	54
Materiales	55
Sustratos.....	55
Polvo de Cobre	55
Equipos.....	56
Dymet D423.....	56
Robot KUKA KR 60-3.....	59
PSD Sympatec HELOS/BR-OM	59
HiWatch.....	60
Otros equipos	60
Software KSS®	60
Mapa de Selección de Parámetros.....	61

Simulación	62
Base de datos	63
Equipos	64
Boquillas	65
Gas, Material y Polvo.....	66
Métodos.	67
Procedimiento de para fabricar los recubrimientos	69
Caracterización y Diagnóstico	72
Cálculo de la eficiencia de depósito	72
Medición de la velocidad de las partículas (HiWatch)	72
Otras técnicas de caracterización utilizadas	74
<i>Microscopía</i>	74
Resultados y Discusión	75
Eficiencia de depósito	75
Velocidad de las partículas.....	76
Micrografías de los recubrimientos	77
Rugosidad de los recubrimientos.....	77
Pruebas con software KSS® (Kinetic Spray Solutions).....	78
Comparación de los resultados obtenidos de forma experimental VS resultados del KSS	83
Conclusiones	83
Recomendaciones / trabajo futuro	85
Bibliografía	85

Introducción

A lo largo del tiempo, el avance científico y tecnológico ha permitido el desarrollo de la humanidad, ha mejorado nuestra calidad de vida, ha resuelto innumerables problemas y hemos aprendido cada día un poco más sobre nosotros, nuestro planeta y lo que nos rodea. Este desarrollo científico y tecnológico, nos ha permitido evolucionar a la cuarta revolución industrial en donde podemos ver tecnología, procesos y productos que hace algunas décadas solo podíamos concebirlos como ciencia ficción. Para lograr esto, han sido necesarios los procesos productivos y de manufactura, los cuales generan todos esos nuevos productos y servicios que responden a los retos y necesidades de nuestra sociedad, donde las nuevas tecnologías están redefiniendo la forma de resolver estos retos y necesidades de nuestra actualidad y nuestro futuro.

Según datos históricos, México es de los centros de manufactura más importantes de Latinoamérica gracias a sus ventajas competitivas; desde importantes tratados comerciales, su experiencia en diferentes industrias, mano de obra e ingeniería calificada, precios competitivos, excelente ubicación geográfica; ventajas que lo hacen un lugar atractivo para empresas de diferentes partes del mundo [1, 2]. Que, si bien esto ha permitido el desarrollo de la industria en nuestro país, lo que hoy en día se busca, es que evolucione del concepto de “país maquilador” y, por consiguiente, mejore su capacidad de aportar innovación y propiedad intelectual. También, se busca que el desempeño del comercio no sólo se atribuya a sus bajos costos de mano de obra, sino a un alto valor agregado a los productos que se producen y exportan[3]. Aquí es donde el concepto de Manufactura Avanzada toma gran importancia para el desarrollo de la tecnología e industria en nuestro país. La manufactura avanzada es la evolución de los procesos de manufactura convencional, es decir, cuando se le agrega tecnología especializada, con el objetivo crear productos más competitivos, seguros, eficientes y con alto valor agregado.

Dentro de la amplia gama de procesos de manufactura avanzada se encuentran los procesos de Proyección Térmica, que se consideran una tecnología de alto valor gracias a su capacidad de modificar propiedades de superficies, mejorando sus capacidades mecánicas y de resistencia, con un alto potencial para manufactura aditiva y que incluso se reconocen como una tecnología respetuosa con el medio ambiente [4].

El Cold Spray (Rociado en Frio) es la última técnica de rociado de la familia de los procesos de Rociado Térmico. Esta tecnología fue descubierta en la década de los 80, en el Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada de la Academia de Ciencias de Novosibirsk, Rusia [5]. El Cold Spray (CS) ha llamado la atención de investigadores e industria gracias a las ventajas que representa frente a otros procesos de proyección térmica tradicionales, como el High Velocity Oxy Fuel (HVOF), Plasma, Arco, etc. Donde, a diferencia de estos procesos tradicionales, el CS es un proceso de deposición de partículas de polvo en estado sólido, las cuales se aceleran a velocidades del orden de 300 a 1200 m/s en un flujo de gas comprimido que alcanza velocidades supersónicas, a través de una boquilla de Laval, con lo que aumenta

la energía cinética de las partículas, que al impactar con el sustrato se deformarán plásticamente quedando adheridas mecánicamente [6]. Gracias a las relativamente bajas temperaturas de procesamiento, que típicamente se encuentran en el rango del 40-70% de las temperaturas de fusión del material, es posible que con esta técnica se logre el depósito de distintos materiales, tales como: metales, cerámicos, polímeros, aleaciones, materiales sensibles a la oxidación y altas temperaturas, etc. [7] El proceso de CS evade los efectos térmicos tales como: oxidación, evaporación, estrés térmico, etc. Con ello, obtenemos ventajas que han generado interés para aplicaciones de reparación, recubrimientos avanzados y manufactura aditiva, con amplio campo de aplicación en el área aeroespacial, biomédica, automoción, de energía, electrónica, entre otras [8].

La eficiencia del proceso de CS se ve afectada por diferentes parámetros de procesamiento, tales como el tipo de gas de procesamiento, su temperatura y presión a lo largo del proceso; la naturaleza del material a depositar, así como el tamaño de las partículas, y también, la geometría de la boquilla que acelera el flujo de gas que arrastra a dichas partículas. Todos estos parámetros afectan directamente en la velocidad crítica que las partículas deben superar para lograr depositarse [5, 9, 11].

Una de las características más importantes del proceso de CS es el flujo supersónico de gas que arrastra a las partículas que están siendo procesadas. Esto se puede lograr gracias a las toberas o boquillas con una geometría convergente-divergente (CD), estas boquillas (también llamadas toberas de Laval), son similares a las que son utilizadas en los motores de cohetes, sin embargo, mientras el propósito principal del diseño de una tobera de Laval de un cohete es maximizar el empuje, en el proceso de CS su propósito principal es obtener la mejor calidad de un recubrimiento de la manera más eficiente [12, 13].

Este trabajo se enfoca en estudiar el efecto que tienen las relaciones geométricas de una tobera de Laval en el proceso de CS, es decir, cómo es que influye la geometría de la tobera de Laval en las características del flujo de gas y partículas. Y cómo es que, gracias a su forma geométrica, se logra superar la velocidad crítica necesaria de las partículas para que logren la adhesión y formen un recubrimiento.

Planteamiento del problema

El proceso de CS se ve influenciado por diversos factores, tal como el tipo de material empleado, el tipo de gas utilizado en el proceso, los valores de presión y temperatura del gas, así como las boquillas empleadas en el proceso, siendo las boquillas una pieza clave para la calidad de los recubrimientos fabricados, es por ello que resulta necesario estudiar los efectos que tienen sobre el proceso de CS las boquillas utilizadas.

El objeto principal de la boquilla rociadora es crear un flujo de partículas de gas y polvo con la energía cinética y térmica adecuada para una buena deposición. Una complicación del proceso de Cold Spray es la tendencia de las boquillas a obstruirse cuando se rocían polvos metálicos de bajo punto de fusión o densos. La obstrucción ocurre cuando las partículas chocan con la pared interna de la boquilla y se adhieren a ella en lugar de rebotar y continuar corriente abajo hacia el sustrato. Las partículas se acumulan y eventualmente obstruyen el paso de la boquilla. La obstrucción es un inconveniente porque interrumpe el proceso de rociado, lo que hace imposible completar una tarea, asimismo disminuye la vida útil de la pistola. Además, cuando se acumulan partículas dentro de la boquilla, el área de la sección transversal de trabajo disminuye, lo que disminuye la velocidad del flujo y, por lo tanto, la velocidad de las partículas, lo que finalmente pone en peligro la capacidad de las partículas para alcanzar la velocidad crítica en el sustrato.

Hipótesis

La eficiencia del proceso de CS se ve afectada por la geometría y dimensiones de la boquilla de Laval; la longitud de las secciones convergente y divergente, así como la relación de expansión (que según la literatura puede rondar los valores entre 3.5 y 4.5). Estos parámetros relacionados entre sí deben proveer un arreglo óptimo, ya que determinan la velocidad necesaria que deben alcanzar las partículas para lograr la adhesión, así mismo, repercuten la calidad de los depósitos y la eficiencia de deposición.

Objetivo General

Estudiar el efecto de la geometría y relaciones geométricas características de una tobera de Laval en el proceso de CS y en los depósitos obtenidos.

Objetivos específicos

- Comparar las características del CS frente a otros procesos de Proyección Térmica
- Realizar depósitos con boquillas de Laval de diferentes geometrías.
- Conocer la relación geométrica de convergencia-divergencia óptima de la tobera de Laval y su influencia en el depósito, tal como la calidad y propiedades del depósito.

Manufactura avanzada y el valor agregado a la manufactura mexicana.

Los procesos de manufactura avanzada son la evolución de los procesos de manufactura convencional, estos procesos se caracterizan por tener un alto contenido científico-tecnológico, que permite mejorar su eficiencia y la capacidad para producir productos cada vez más complejos, competitivos y de alto valor agregado. Estos responden rápidamente a las necesidades del consumidor a través de innovaciones en los procesos de producción, empleando prácticas amigables con el medio ambiente que sean sostenibles y que conduzcan a un mejor desempeño y la reducción de desechos. [14].

Desde los años 80s, México se ha orientado hacia la estrategia de agregar valor a la manufactura, por lo que, la Manufactura Avanzada es considerada como una opción potencial [1].

Aunque en el país se producen y exportan productos de alto y medio-alto contenido tecnológico de diferentes sectores, hay aún, poca adición de valor a esas exportaciones y la generación interna de I+D (Investigación y Desarrollo) es reducida [1]. Según el INEGI, la Participación del Contenido Nacional de las Exportaciones Globales en la Producción Manufacturera Global para el año 2019 fue del 45.9% [15]. Cifra que, si bien parece alentadora, una realidad es que todos los productos que se utilizan en México son fabricados mediante un proceso que requiere insumos, herramientas y equipamientos, de los cuales, un elevado porcentaje de éstos son importados [1, 17].

El modelo de desarrollo que México ha manejado, ha logrado mantener una posición competitiva con un gran volumen de exportaciones, sin embargo, actualmente el panorama demanda aportar mayor innovación y propiedad intelectual propia, lo cual, sumado con la inversión extranjera, puede desembocar en la elevación del valor agregado de los bienes producidos, y al mismo tiempo, posicionándonos de forma estratégica en el mercado de la innovación [3].

Es claro que existe un amplio campo de oportunidad para adoptar a la manufactura avanzada como herramienta para incrementar el nivel de desarrollo científico y tecnológico, así como la innovación en nuestro país, y así, dejar atrás el desempeño atribuido a un costo de mano de obra comparativamente menor, mejorando el desempeño [2].

Procesos de proyección térmica, un campo con potencial de alto valor agregado en México.

De acuerdo con P. Vuoristo [8], los Procesos de Proyección Térmica, también conocidos como Procesos de Rociado Térmico, son un grupo de procesos de recubrimiento, en el que los materiales metálicos y no metálicos pueden ser depositados, en forma de finas partículas, las cuales pueden estar fundidas, semi fundidas o en estado sólido, para poder formar un recubrimiento o un depósito sobre una superficie.

Los recubrimientos o depósitos tienen diferentes fines o aplicaciones, y estos pueden tener espesores en el rango de algunos micrómetros hasta varios milímetros, dependiendo de su aplicación, donde se buscan propiedades únicas y específicas para los componentes recubiertos, incluso, recientemente se tiene interés en que estos procesos puedan emplearse en la manufactura aditiva y en la reparación de componentes dañados.

En los procesos de proyección térmica se emplea una fuente de calor (que puede ser una flama, un arco eléctrico o plasma) para fundir o semi fundir la materia prima (que puede ser en forma de polvo, alambre, barra, suspensión/solución) y acelerar las partículas hacia la superficie de un sustrato (que es el material o componente a recubrir). Además, otras fuentes de energía térmica o cinética son utilizadas para calentar y acelerar a las partículas, tales como, laser, o bien, el flujo supersónico de un gas inerte para el proceso de Cold Spray (CS), Figura 1.



Figura 1. Principio de los procesos de rociado térmico [8].

Los recubrimientos o depósitos se generan si las partículas se deforman plásticamente al impactar con la energía suficiente contra el sustrato y con ello lograr su adhesión, esto puede ocurrir si están fundidas o en estado sólido (CS) y en este último caso, si la velocidad de la partícula al momento de impacto es lo suficientemente alta y supera la velocidad crítica [4, 18, 19].

Los procesos de proyección térmica son ampliamente utilizados en la industria, por ejemplo, en aplicaciones de ingeniería mecánica, aviación, tecnologías de la energía, aplicaciones biomédicas, electrónica, etc. Esto es debido a diferentes razones, como [8]:

- Capacidad para procesar una gran cantidad de distintos materiales, tales como: metales puros, aleaciones metálicas, metales duros (carburos/cermets), cerámicas, polímeros y combinaciones de estos materiales.
- Mejora en las propiedades mecánicas de las piezas o partes recubiertas, por ejemplo, resistencia al desgaste térmico, oxidación, aumento de la dureza de las superficies, etc.

- Obtención de distintas propiedades funcionales a partir del recubrimiento.
- Tasa de producción notablemente alta, adecuada para superficies de gran tamaño.
- Costos de fabricación aceptables para la mayoría de las aplicaciones industriales.
- Tecnología ecológica, especialmente cuando se compara con el cromado duro (hard chromium plating).
- Gracias al desarrollo de nuevas variaciones tecnológicas de la proyección térmica, tal como el CS, es posible la deposición de materiales sensibles a la oxidación y a las altas temperaturas de procesamiento, lo que permite un nuevo y amplio campo de aplicación.

Los procesos de proyección térmica se consideran también una tecnología clave y respetuosa con el medio ambiente para diseñar y modificar las propiedades de las superficies y las características de los componentes de distintos materiales. Por ejemplo, la sustitución del proceso de galvanoplastia (que genera cromo hexavalente, metal tóxico) por recubrimientos de cromo duro, fabricados mediante procesos de proyección térmica [16].

Los procesos de Proyección térmica, como procesos de manufactura avanzada, toman una gran importancia para la industria actual de nuestro país, dado que incluyen el uso de tecnología en el control del proceso, desarrollo de materiales avanzados y son ampliamente utilizado por diferentes campos de la industria, tales como la Aeroespacial, Automoción, Biomédica, energía, electrónica, entre otras, en las cuales buena parte de estas industrias México tiene participación a nivel global.

Para continuar con la línea de evolución de la manufactura convencional hacia la manufactura avanzada, investigar y emplear los procesos de proyección térmica pueden ser una buena oportunidad de crecimiento y desarrollo para estas industrias en México, permitiendo aumentar el valor agregado de los productos producidos y contribuyendo a la investigación y desarrollo que se requiere para aumentar la competitividad a nivel mundial, dados los pasos agigantados que presentan en este sentido países como China, EE.UU., Alemania, etc.

Dicho lo anterior, es importante la identificación de empresas en México que implementen los procesos de proyección térmica, de acuerdo con el directorio proporcionado por el Mapa de Ruta para la Industria Aeroespacial en México 2014, se enlistan las siguientes en el rubro Aeroespacial [17]:

- Honeywell Aerospace de México (Chihuahua)
- Tighitco Latinoamérica (Chihuahua)
- Tecnología avanzada en composite (Durango)
- Elison Surface Technologies (Sonora)
- Hysrsa American Steel Crowners (Querétaro)
- General Electric (Querétaro)
- Procesos térmicos especiales de México (Nuevo León)

Clasificación de los procesos de Proyección Térmica

Los procesos de proyección térmica son usualmente clasificados de acuerdo al tipo de fuente de energía que es utilizada para fundir el material a depositar. Las fuentes de energía más utilizadas en el rociado térmico son térmicas y/o cinéticas, obtenidas a partir de combustión de gases, los cuales pueden ser hidrocarburos, hidrogeno, o líquidos; la energía térmica se obtiene a partir de descargas eléctricas como arcos eléctricos o plasma [8]. En la Figura 2 se muestra la clasificación de los procesos de proyección térmica de acuerdo al tipo de fuente de energía.



Figura 2. Clasificación de los procesos de rociado térmico de acuerdo al tipo de fuente de energía utilizado en el proceso. Fuente: Tampere University of Technology, 2014 [8].

En la Figura 3 se presenta la ubicación en el gráfico de diversos procesos de rociado térmico respecto a la temperatura y velocidad de las partículas pulverizadas [18].

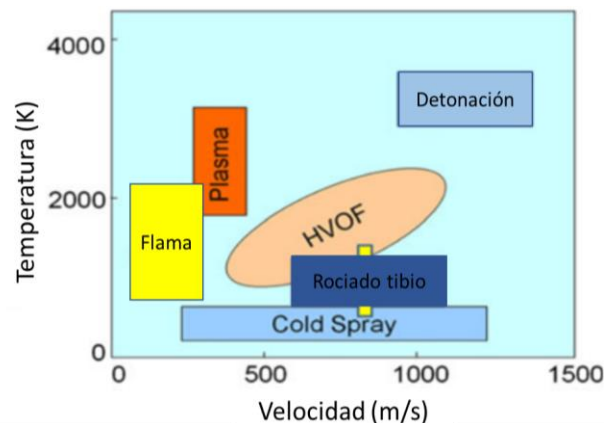


Figura 3. Gráfico de la ubicación de los distintos procesos de proyección térmica según la temperatura y la velocidad de las partículas [18].

A continuación, se aborda de manera general los diferentes métodos y tecnologías de proyección térmica.

Flame Spraying (Proyección por flama)

La proyección por flama es cronológicamente la primera técnica de rociado térmico, fue desarrollada por Dr. Schoop, a principios del siglo XX [19]. Es uno de los métodos más simples de los procesos de proyección térmica, barato y fácil de operar. Puede utilizar polvo, varilla o alambre como materiales de alimentación. El material de alimentación es fundido en una flama de combustible-oxigeno (donde el combustible puede ser acetileno, propano e hidrogeno), después es acelerado (mediante el flujo de gas en expansión) y posteriormente impacta contra el sustrato o superficie a recubrir [8]. Los principales parámetros de procesamiento son la distancia de rociado en el rango de 120-250 mm, en una atmosfera abierta, alcanzando el sustrato una temperatura de 250°C [20], Figuras 4 y 5.

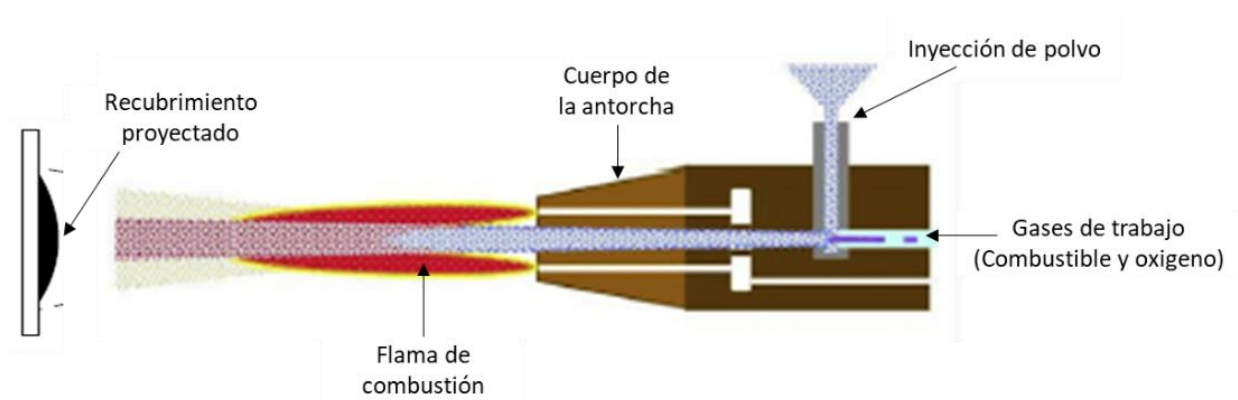


Figura 4. Esquema de la proyección por flama con polvo como material de aporte. Tampere University of Technology [8] / Complementada con la referencia [19].

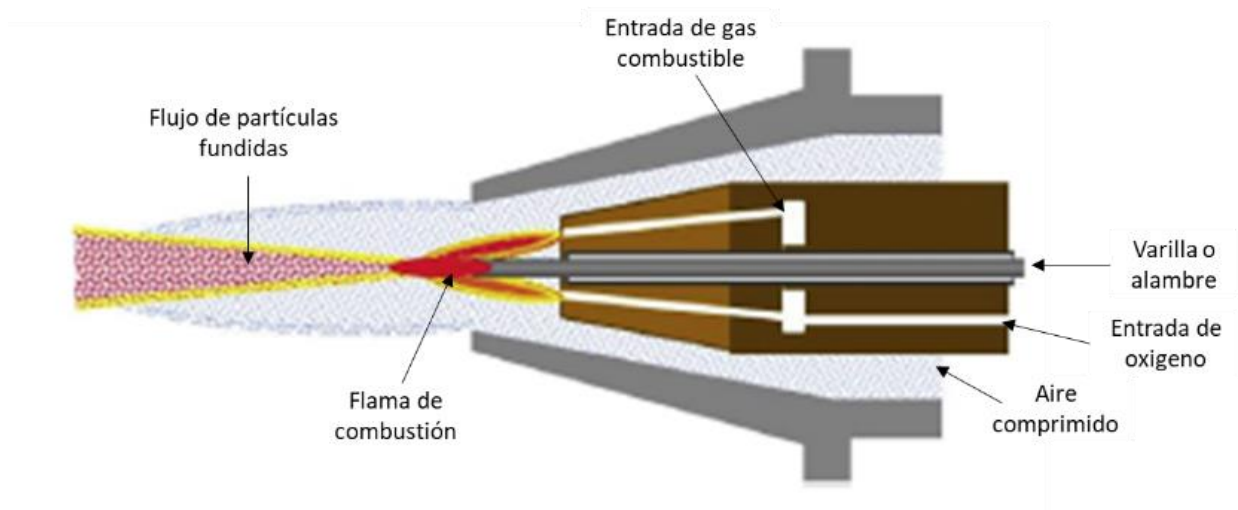


Figura 5. Esquema de la proyección por flama con varillas o alambre como materiales de aporte. [8] Complementado con la referencia [19].

Arc Spraying (AS)

La proyección por arco (arc sprayig) fue originalmente inventada y patentada por el Dr. Schoop al inicio del siglo XX [21]. El proceso utiliza un arco eléctrico de corriente directa que es generado entre dos alambres de electrodos (consumibles que se alimentan continuamente). El arco eléctrico que se forma entre las puntas de los alambres funde estos mismos, mientras un chorro de aire de alta velocidad atomiza e impulsa el metal fundido hacia el sustrato formando el recubrimiento. La eficiencia térmica de este proceso es considerablemente mayor que cualquier otro proceso de proyección térmica [20]. Los principales parámetros de procesamiento son la potencia eléctrica (5-10 kW), la temperatura del arco (puede alcanzar los 6100 K con una corriente de 280 A), el voltaje del arco eléctrico (20-40 V), la tasa de deposición (50 a 1000 g/min), presión del gas de procesamiento (0.2 a 0.7 MPa), entre otros [19], Figura 6.

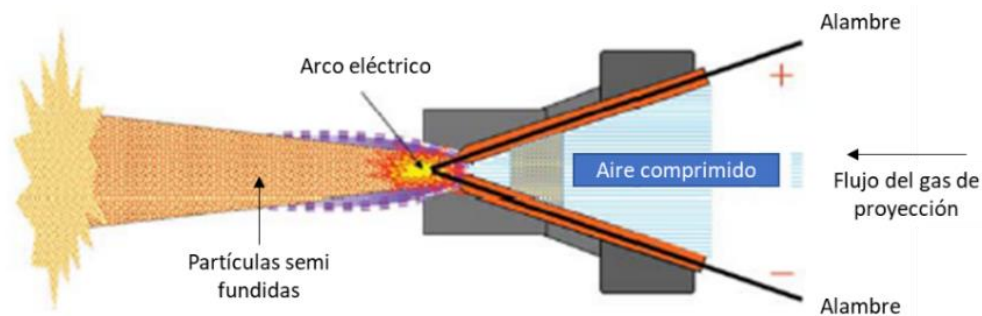


Figura 6. Esquema del sistema de proyección por arco eléctrico, Tampere University of Technology [8]. Complementado con la referencia [19].

High velocity oxi-fuel (HVOF) – High velocity air-fuel

Esta técnica fue desarrollada por Union Carbide a finales de los años 50 [21]. Esta técnica utiliza materia prima en polvo que puede ser inyectada axial o radialmente según el tipo de pistola empleada. Los gases se inyectan en la cámara de combustión bajo presión (0.3-4 MPa). El gas quemado se acelera en la boquilla hasta alcanzar velocidades de llama supersónicas. La materia prima se introduce en la boquilla mediante un gas portador (nitrógeno o argón), lo que da lugar a una alta velocidad de las partículas proyectadas. Los principales parámetros del proceso son la distancia de rociado (150-300 mm), la pulverización en atmósfera abierta y el tamaño de partícula de la materia prima en polvo (5-45 μm) [19], Figura 7.

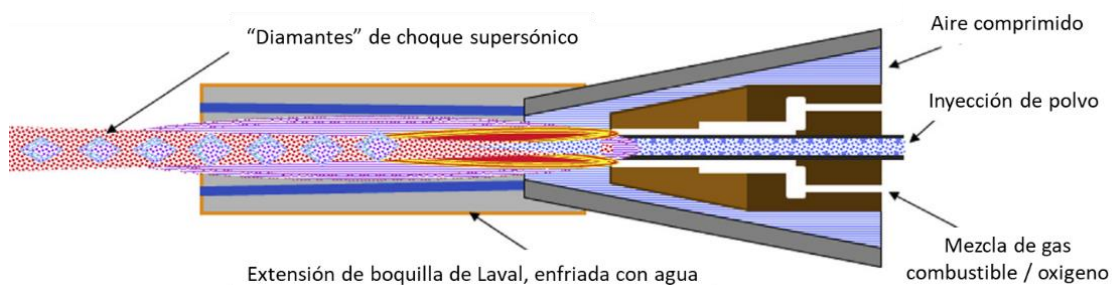


Figura 7. Esquema de antorcha HVOF, Tampere University of Technology [8].

HVAF Spraying

El proceso HVAF puede considerarse como una modificación del proceso HVOF. La diferencia es que este proceso utiliza una mezcla de aire y gas combustible para acelerar el material en forma de polvo desde la pistola contra el sustrato a altas velocidades. El costo de operación es menor comparado con el proceso HVOF ya que utiliza aire y permite una combustión más segura y controlable, así mismo, permite tasas de alimentación más altas que el sistema HVOF. Además, ofrece recubrimientos de baja oxidación y alta densidad, este sistema se muestra en la Figura 8.

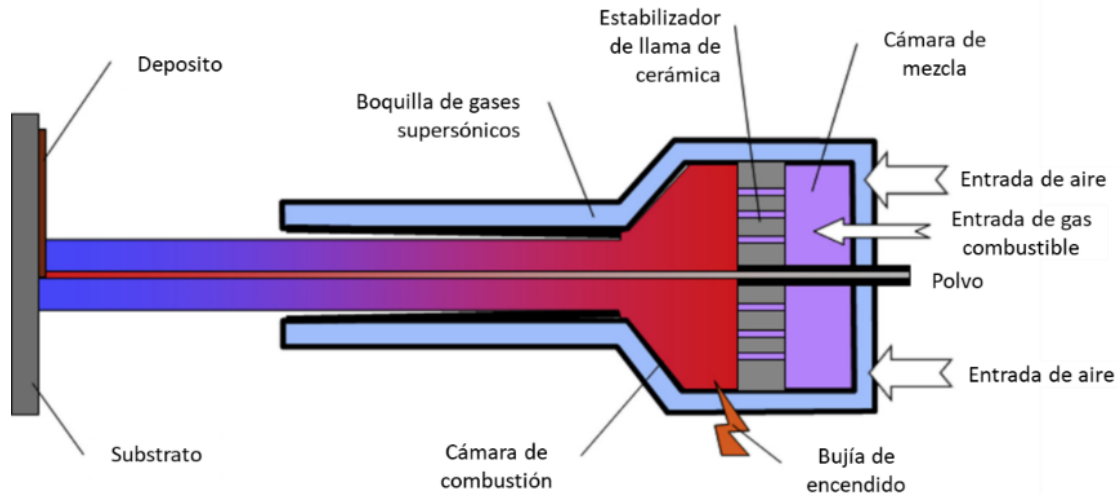


Figura 8. Ilustración de una antorcha HVAF de tercera generación (tipo M3) que utiliza gas hidrocarburo y aire como gases de procesamiento. Fuente: Unique coat Technologies Inc. [8].

D-gun

El proceso D-gun fue desarrollado por Union Carbide a mediados del siglo XX [19].

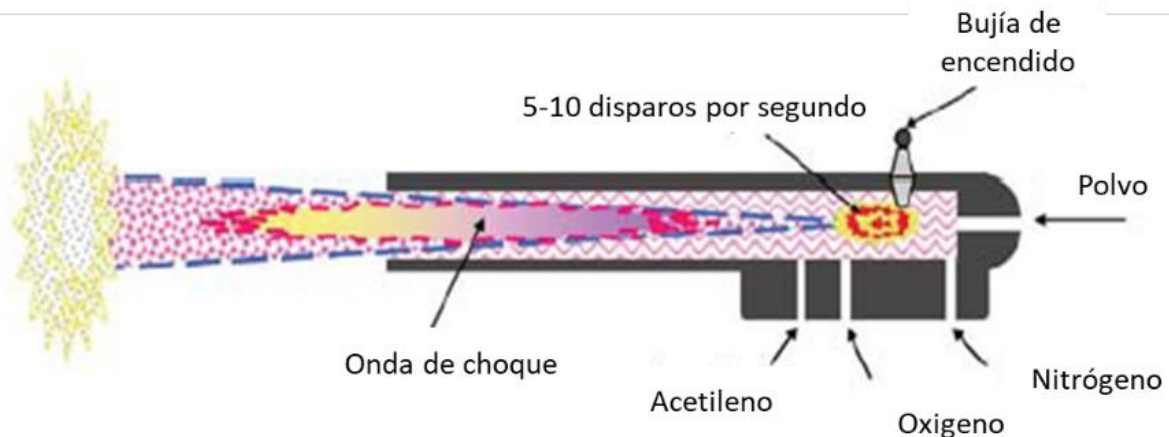


Figura 9. Estructura esquemática de los equipos de aspersión por detonación. Fuente: Universidad Tecnológica de Tampere [8].

Consiste en una onda de choque y una zona de reacción (Figura 9). La onda de choque es provocada por una detonación, la cual desplaza los gases a una velocidad casi constante

(entre 1500 y 3000 m/s), y con ellos se arrastran las partículas suministradas hacia el sustrato.

El proceso sigue los siguientes cuatro pasos: (a) Inyección de oxígeno y combustible en la cámara de combustión; (b) Inyección de polvo y nitrógeno para evitar el "backfiring", es decir, la explosión del suministro de gas combustible; (c) Ignición de la mezcla, detonación, aceleración del polvo debido a la onda de detonación e impacto de las partículas sobre el sustrato; (d) Purga del cañón con nitrógeno.

Una vez que se purga el barril, el proceso comienza de nuevo. Las etapas (a) y (b) son las preliminares, mientras que las etapas (c) y (d) son autónomas e independientes del sistema de control del proceso [22]. Se producen entre 1 y 15 detonaciones por segundo con purgas de nitrógeno entre ellas [19].

Atmospheric Plasma Spraying (APS)

El proceso de proyección por plasma es un método muy utilizado para fabricar diferentes tipos de recubrimientos. Este proceso que utiliza plasma térmico como fuente de calor a alta temperatura, permite fundir prácticamente todos los materiales posibles, incluidos todos los materiales cerámicos y los metales refractarios. El plasma se produce transfiriendo energía a un gas hasta que el nivel de energía es suficiente para ionizar el gas [8].

La antorcha para el rociado por plasma se basa en el generador de plasma de tipo Gerdien (Gerdien y Lotz, 1922). Este proceso de rociado térmico que emplea plasma, fue patentado por Gage et al. (1962), así como por Giannini y Ducati (1960) [19].

La proyección por plasma consiste en la proyección de un material mediante el uso de un gas (o una mezcla de gases) ionizado(s). Se utiliza un campo eléctrico para ionizar los gases y producir plasmas térmicos o arcos de plasma, mediante los cuales se propulsa el material en forma de polvo hacia la superficie del sustrato. En la pistola de proyección por plasma, la antorcha de plasma es generada por un ánodo (usualmente cobre o grafito) y un cátodo (tungsteno toriado). La descarga eléctrica generada entre el ánodo y el cátodo ioniza el gas (o la mezcla de gases) que se expande en la atmósfera formando un flujo. El material de alimentación (polvo) se inyecta en el chorro, se acelera y se impulsa hacia el sustrato para impactar contra este y formar el recubrimiento [20].

Muchos diseños utilizan boquillas convergentes o divergentes (de Laval) para lograr una expansión supersónica, lo que aumenta significativamente la velocidad de las partículas, mejorando así las propiedades del recubrimiento o depósito. Es denominado APS (Atmospheric Plasma Spraying) ya que trabaja en una atmósfera ambiente, ver Figura 10 [8].

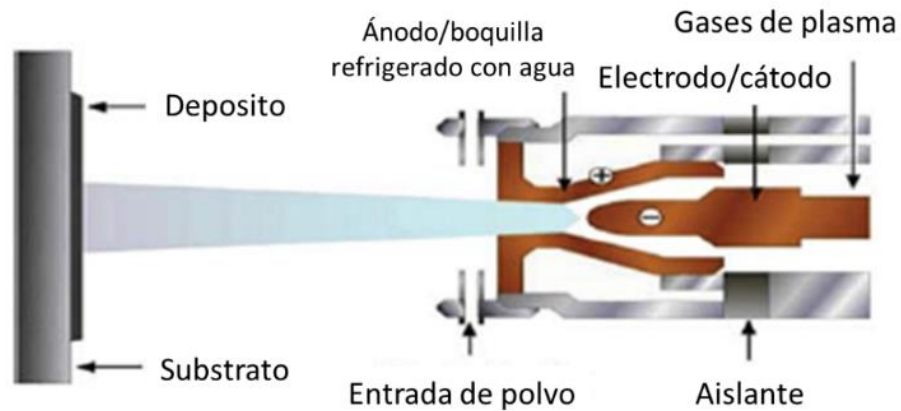


Figura 10. Representación esquemática de una pistola de plasma que utiliza corriente directa para la formación de plasma. Fuente: Universidad Tecnológica de Tampere [8].

Low-Pressure Plasma Spraying (LPPS)

El proceso LPPS fue desarrollado por E. Muehlberger en la década de los 70s. La principal diferencia entre el proceso LPPS con el proceso APS es que este proceso se lleva a cabo dentro de una cámara de vacío lo cual elimina la interacción de las partículas fundidas proyectadas con el gas circundante, el cual contiene oxígeno. Esto permite emplear este proceso en la fabricación de recubrimientos con materiales sensibles a la oxidación. Además, permite una porosidad inferior al 1% y sus recubrimientos son libres de inclusiones de oxido.

El equipo LPPS consiste en una pistola de plasma convencional equipada con una boquilla modificada para obtener una mayor relación de expansión de la presión. Estas relaciones elevadas se consiguen porque el chorro de plasma sale a la cámara a una presión inferior a la atmosférica, normalmente a un nivel de 100 mbar.

El entorno cerrado de las cámaras requiere la manipulación remota de las pistolas de rociado LPPS, así como bombas para generar vacío, la refrigeración y filtración de los gases de escape y la refrigeración de las paredes de la cámara.

El proceso LPPS tiene las siguientes características en comparación con el proceso convencional APS: interfaces más limpias; recubrimientos sin óxido; altas densidades de recubrimiento; bajas tensiones residuales; mayor capacidad de espesor de deposición (>25 mm); y alta capacidad de precalentamiento del sustrato/depósito: más de 1000 °C antes y durante procesamiento [8].

A continuación, en la Tabla 1, se muestra una comparativa de los procesos de proyección térmica, con sus características más importantes.

Tabla 1. Comparativa de los Procesos de Proyección Térmica.

Proceso	Año	Fuente de energía	Variables del proceso				Características del depósito obtenido				
			Tamaño nominal de las partículas (μm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ^a	Velocidad de la partícula (m s^{-1})	Tasa de deposición (Kg h^{-1})	Adhesión (MPa) ^b	Contenido de Oxido (%) ^c	Porosidad (%)	Espesor típico del recubrimiento (mm)	Costo relativo ^d , Bajo=1 Alto=5
Flame Spraying (FS)*	1910	Combustión (difusiva)	30 - 125	3000	40	2-6	8	10-15	10-15	0.1-15	1
Arc Spraying (AS)*	1911	Descarga eléctrica		4000	100	10-25	12	10-20	10	0.1-15	2
High Velocity Oxi-Fuel (HVOF)*	1983	Combustión (deflagración)	10 – 60 Típicamente de 15 - 45	3000	600-800	2-8	>70	1-5	1-2	0.1-2	3
High Velocity Air Fuel Spraying (HVOF)	-	-	10 – 45 Típicamente de 15 – 30	2000-3000	600-1200 ^e	Metales duros. 2-30 Metales: 2-23 ^g	>70	*** ^f	0-0.2	0.1-12	2
Detonation gun spraying (D-Gun)	1955	Combustión (Detonación)	-	4000	800-1200	0.5-2	>70	1-5	1-2	0.05-0.3	4
Atmospheric plasma spraying (APS)*	1939 - 1951	Descarga eléctrica	10 – 70 Diferentes rangos de tamaño son utilizados	12000	200-400	2-10	10-70	1-3	1-5	0.1-1	4
Low Pressure Plasma Spraying (LPPS)	1973	Descarga eléctrica	10 – 70 Diferentes rangos de tamaño son utilizados	12000	400-600	2-6	>70	0	<0.5	0.1-1	5
Low Pressure Cold Spray (LPCS)	80s	Expansión de gas	10 – 30 Polvos finos en LPCS	200-650	300-500	0.5-3	5-30	0	<0.5	0.2-2	1
High Pressure Cold Spray (HPCS)	80s	Expansión de gas	10 – 30 Polvos más gruesos en HPCS	500-1000	400-800	4-12	10-40	0	<0.5	0.3-4	4

^a Temperatura de la fuente de calor. ^b Depende del material del depósito. ^c Contenido de óxido en los depósitos metálicos. ^d Costo de inversión del proceso. ^e Depende del tipo de equipo; por ejemplo, M2 AC-HVOF, 600-700 m s⁻¹; M3 SAP, 800-1200 m s⁻¹. ^f El contenido de óxido es aproximadamente 1,5-2 veces el contenido de óxido de la materia prima. ^g Depende del tipo de pistola; pistola M2 AC-HVOF; pistola M3 supersónica. Fuente: Tampere University of Technology [8]. Y complemento de la referencia [21]

calentar para acelerar a las partículas, lo cual limitó la velocidad máxima que las partículas pudiesen alcanzar, ver Figura 13.

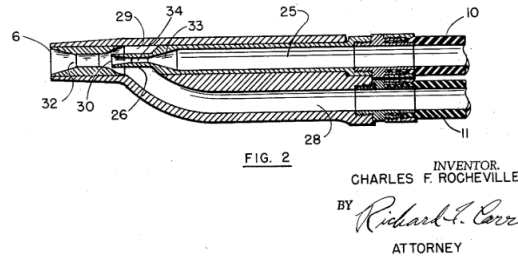


Figura 13. Dispositivo patentado por Rocheville, donde se aprecia el uso de una boquilla CD [25].

Fue hasta la década de 1980, cuando el proceso de Cold Spray que se utiliza actualmente fue desarrollado en el Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada de la Academia de Ciencias de Rusia en Novosibirsk por el Dr. Anatolli Papyrin y sus equipo de trabajo [26]. Estos se encontraban realizando experimentos en un túnel de viento supersónico para estudiar el flujo bifásico alrededor de un cuerpo utilizando pequeñas partículas trazadoras, con lo que se observaron que a cierta velocidad (Velocidad Crítica de las partículas - V_{cr}), hubo una transición de la erosión de la superficie del cuerpo a una deposición de las partículas sobre esta superficie. Este fenómeno lo llamaron “Gas Dynamic Cold Spray” y lo desarrollaron como una tecnología para recubrimientos, logrando depositar un amplio rango de metales puros, aleaciones metálicas y compuestos en una variedad de sustratos de distintos materiales, con diferentes aplicaciones. Se patentó en Estados Unidos en 1994 [27]. De acuerdo a los diagramas presentados en la patente (Figura 14), podemos observar que el sistema utiliza una boquilla de Laval con el objetivo lograr una mayor aceleración de los gases de procesamiento y, en consecuencia, lograr que las partículas alcancen mayores velocidades.

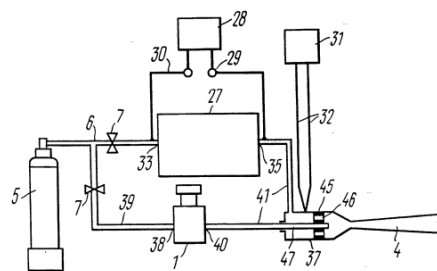


Figura 14. Esquema mostrado en la patente de Anatolli Papyrin de 1994 [27].

Se ha realizado amplio trabajo de investigación alrededor del mundo por varios centros de investigación y diferentes industrias en el proceso de CS, debido a su valor y características inigualables comparado con otros procesos de Proyección Térmica.

Principio de funcionamiento del CS

El Cold Spray es el proceso más novedoso de la familia de procesos de proyección térmica. En este proceso se aceleran partículas (de materiales metálicos o no metálicos) en el rango

de tamaño de 1 a 50 μm , a altas velocidades (300 a 1500 m/s) [7, 30] con ayuda de una boquilla o tobera supersónica. Es llamado “Cold” ya que trabaja a temperaturas relativamente bajas (<1000°C)[29], por lo que es un proceso de estado sólido, y las temperaturas a las que son expuestos los materiales no son lo suficientemente altas para causar la fundición de los materiales, ya que esto no es necesario para que se permita la adhesión de los materiales, a diferencia de los procesos de proyección térmica tradicionales. La tecnología de CS es diferente, el aumento de la energía cinética de las partículas permite que cuando estas sean proyectadas hacia la superficie de un sustrato, logren adherirse debido a la deformación plástica que sufren al impactar contra el sustrato y posteriormente, se forme el recubrimiento al impactar con las partículas ya adheridas, ver Figura 15.

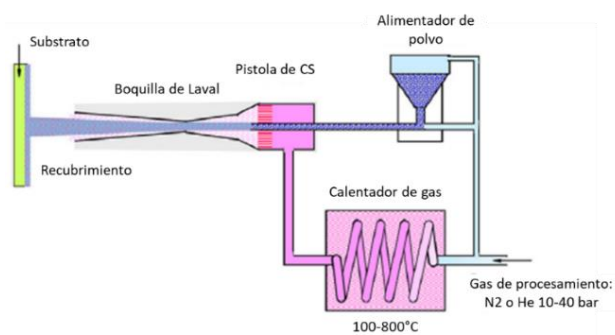


Figura 15. Representación esquemática del proceso de Cold Spray, Linde AG [8].

Este proceso depende de distintos parámetros, tales como temperatura, velocidad, tamaño de las partículas, geometría de la tobera y otros factores que permitan depositar el material a una temperatura considerablemente baja. Como consecuencia de la baja temperatura de procesamiento, se eliminan los efectos perjudiciales de la oxidación, evaporación, fusión, cristalización, tensiones residuales, falta de adhesión, y otros problemas comunes de los procesos de proyección térmica tradicionales a alta temperatura [28].

Algunas ventajas que presenta el CS son: capacidad de proteger los materiales contra la corrosión, aumentar la resistencia al desgaste y la durabilidad mecánica, crear componentes con diferentes conductividades térmicas y eléctricas, recubrimiento de alta resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia en un entorno con alta temperatura, control de holguras, restauración y reparación, manufactura aditiva, prótesis con mejor resistencia al desgaste, entre otras aplicaciones [7].

Gracias a estas ventajas que ofrece el CS, se ha utilizado en un amplio rango de aplicaciones e industrias, desde la aeroespacial en la reparación de los motores de cohetes y turbinas de gas, así como en la industria petroquímica, eléctrica, electrónica, automotriz, y la biomédica [7]. De acuerdo con Gr. Maev et al. [30], se pueden clasificar las tecnologías del CS en cuatro grupos, según sus parámetros mecánicos, térmicos y eléctricos, de corrosión y biocompatibilidad, así como tecnológicos. Estas aplicaciones son resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Desarrollo de las aplicaciones del CS, fuente: Cold Gas Dynamic Spray [30].

El desarrollo de las aplicaciones del CS			
Propiedades deseadas	Aplicaciones	Ejemplos	Comentarios sobre la tecnología de CS
Propiedades Mecánicas	Restauración y sellado de metales	Bloques de motor, piezas de fundición, moldes y matrices, costuras de soldadura, reparación de carrocerías, equipos de climatización, equipos de refrigeración, intercambiadores de calor y equipos criogénicos	1. La aplicación de metales blandos (Al, Zn, Sn) que es preferible con LPCS 2. Necesidad de equipos móviles LPCS portátil
	Recubrimientos resistentes al desgaste y de baja fricción	Los componentes de la matriz, las válvulas y el pistón guías de biela con un bajo coeficiente de fricción	1. La aplicación de compuestos resistentes al desgaste (WC-Co, aleaciones de NiCr) es posible con HPCS 2. Algunos componentes con dureza de unos 200HB pueden ser depositados por LPCS
	Recubrimientos para la fricción	Aumenta la fricción de los rodillos para fabricación de papel	El recubrimiento compuesto contra la fricción puede ser fabricado por LPCS
	Propiedades antiadherentes	Depósitos impregnados con agentes desmoldantes como el politetrafluoroetileno o la silicona	Los recubrimientos a base de metales blandos con de alta porosidad son fabricados por LPCS
Propiedades térmicas y eléctricas	Barreras térmicas	Cabezas de pistón de aluminio, colectores, frenos de disco y componentes de motores	Los recubrimientos a base de Al-Ti y recubrimientos compuestos están siendo fabricados por HPCS y LPCS
	Disipación térmica	Recubrimientos de cobre o aluminio en disipadores para la microelectrónica	El recubrimiento a base de Cu y Al está se realiza mediante HPCS con una alta eficiencia de deposición
	Preparación de la soldadura	Componentes de microelectrónica y placas de circuito impreso	La soldadura de Ag y Sn se está realizando el recubrimiento compuesto por HPCS y LPCS
	Recubrimientos eléctricamente conductivos	Parches de cobre o aluminio en metal y componentes cerámicos o poliméricos (McCune, 2003)	El recubrimiento a base de Cu y Al está se realiza mediante HPCS con una alta eficiencia de deposición
	Recubrimientos dieléctricos	Recubrimientos cerámicos para la industria aeroespacial, automotriz y empaques electrónicos	El recubrimiento compuesto a base de cerámica es fabricado por HPCS
Propiedades de corrosión y biocompatibilidad	Protección contra la corrosión localizada	Depósitos de zinc o aluminio en los cascos, soldaduras u otras juntas en las que en las que la capa protectora original en el material base se ha visto afectada por el proceso de fabricación	1. La aplicación de metales blandos (Al, Zn, Sn) que es preferible con LPCS 2. Necesidad de equipos móviles - equipo LPGDS
	Biomédica	Materiales biocompatibles/bioactivos en implantes ortopédicos, prótesis e implantes dentales. Los revestimientos porosos de estos materiales en los dispositivos de carga facilitan la fijación del implante y el crecimiento del hueso, sustituyendo la necesidad de cementos y tornillos.	El recubrimiento hecho mediante GDS, de base hidroxiapatita permite conservar la nanoestructura de la hidroxiapatita en comparación con el HVOF o de plasma
	Recubrimientos decorativos	Componentes metálicos y cerámicos	Se prefiere equipo móvil LPCS
Modificación de la tecnología	Prototipos rápidos y fabricación casi neta	Puede producir una pieza bien definida. Fabricación de piezas con estructura compuesta de matriz metálica o estructuras de gradiente personalizadas.	CS nos permite crear la tecnología más flexible y más económica para componentes de espesor delgado.

Sistemas de CS de alta y baja presión

El proceso de CS se clasifica en dos tipos, Cold Spray de Baja Presión y Cold Spray de Alta Presión, LPCS y HPCS por sus siglas en inglés, respectivamente. Las diferencias principales de estos dos tipos de CS radican en el método y posición en la que se inyectan las partículas en la boquilla para ser aceleradas, así como la diferencia en la presión del gas y temperatura de procesamiento [5].

High Pressure Cold Spray (HPCS)

En los sistemas de alta presión (HPCS), el polvo es inyectado comúnmente de manera axial antes de sección convergente de la tobera, en lo que se conoce como precámara. Se utiliza Helio o Nitrógeno como gases de procesamiento, con presiones de estancamiento que pueden ser establecidas entre 1 y 5 MPa, y una temperatura de 300 a 1000°C. Las partículas pueden alcanzar velocidades entre 600 y 1200 m/s[7], Figura 16.

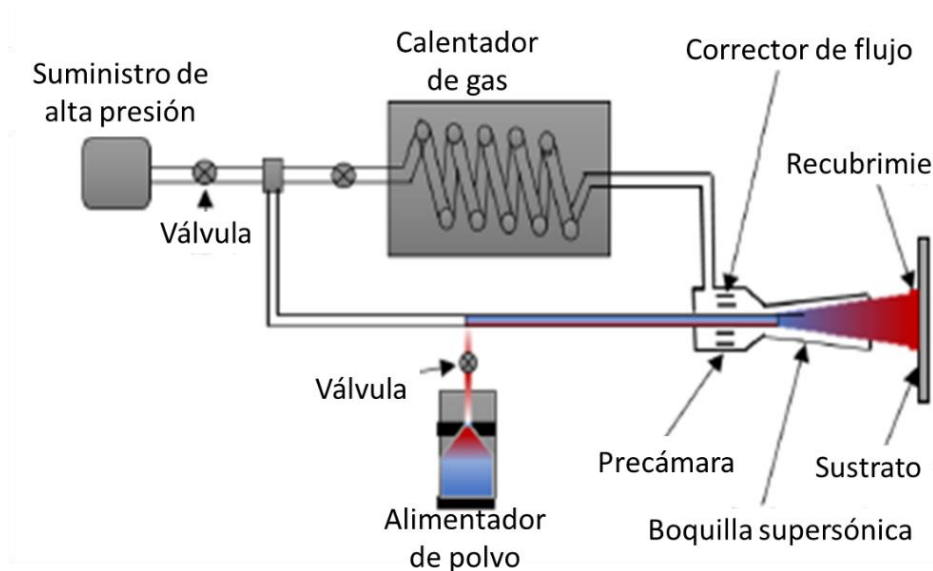


Figura 16. Concepto fundamental del sistema Cold Spray de alta presión, HPCS [7],[31].

El sistema de alta presión puede alcanzar una mayor eficiencia de deposición (puede variar dependiendo del material utilizado) del orden del 90%, ya que las velocidades de impacto de las partículas que se logran con este equipo son mayores que las obtenidas con un sistema LPCS.

Dentro de las desventajas que tienen los sistemas de CS de alta presión encontramos aparatos complejos, robustos y considerablemente más costosos que los sistemas de baja presión, además, es común encontrarse con la aglomeración de partículas dentro de la tobera, especialmente cuando se eleva la velocidad y temperatura de las partículas, o bien la erosión de la boquilla, lo cual provoca desgaste y un mal funcionamiento de esta [7].

Low Pressure Cold Spray (LPCS)

En los sistemas CS de baja presión (LPCS), comúnmente el polvo es inyectado en la garganta de la tobera, o bien en la sección Divergente de la boquilla de Laval con ayuda de un gas de arrastre de baja velocidad y baja presión; puede ser inyectado de forma axial o radial.

Este sistema emplea una presión de estancamiento relativamente baja (característica representativa que le confiere su nombre) en el rango de 0.5 a 1 MPa; utiliza usualmente nitrógeno, helio o aire como gas de procesamiento, el cual se encuentra precalentado a una temperatura de hasta 600°C; este se encarga de acelerar las partículas a través de la boquilla CD hasta el impacto contra el sustrato[7], ver Figura 17, alcanzando velocidades en un rango de 300-600 m/s en la zona divergente de la boquilla [31].

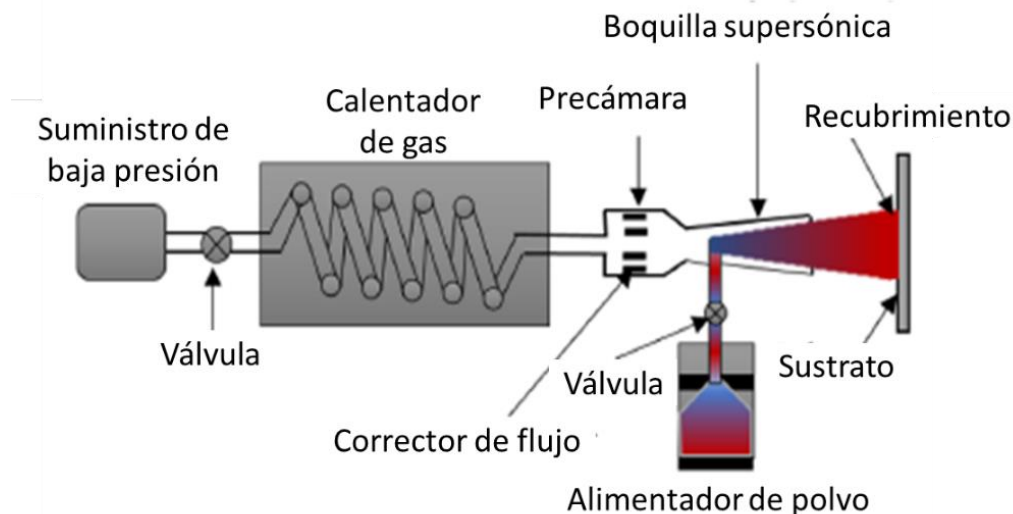


Figura 17. Concepto fundamental del sistema Cold Spray de Baja Presión, LPCS [7],[31].

La forma en la que las partículas de polvo son transportadas desde el alimentador de polvo hasta la boquilla, es consecuencia del efecto Venturi, es decir, son aspiradas desde el alimentador hasta la boquilla por este efecto, donde se mantiene la presión estática dentro de la boquilla por debajo de la presión atmosférica [31].

Los sistemas de baja presión son más flexibles, fáciles de transportar y con costos de operación más bajos comparado con un sistema de alta presión. Una desventaja significativa es que la variedad de materiales que puede depositar es reducida, limitándose en su mayoría a materiales dúctiles, o bien con bajas tasas de deposición, donde la eficiencia de depósito no excede el 50% [31], dado que la velocidad de salida es relativamente baja, usualmente $M < 3$ [7].

Una ventaja considerable es que la vida útil de la boquilla es más duradera, ya que las partículas solo pasan por la sección divergente con una baja temperatura, reduciendo así el desgaste y aglomeración de partículas en la pared de la boquilla [7][31].

A continuación, en las Tablas 3 y 4, se muestra información sobre las diferencias entre los sistemas HPCS y LPCS.

Tabla 3. Clasificación del proceso de CS y algunos de sus dispositivos [30].

Clasificación del proceso CS y algunos de sus dispositivos					
Tipo de equipo	Gas de procesamiento			Principales características	Dispositivos comerciales < >
	Tipo de gas	Presión de estancamiento (MPa)	Temperatura de estancamiento (°C)		
Alta presión / baja temperatura	a	1-(4)	Menos de 600	Dispositivo CS de primera generación	Desarrollado por investigadores <SM Kinetiks 3000> <Taekwang Tech (Korea)>
Alta presión / alta temperatura	a	-4 (max.5)	Mas de 1000	Dispositivo CS de segunda generación Aplicación al metal anti fuego	<SM Kinetiks 4000, 8000> <II 5/8, 5/11> < PG PCS-800, 1000>
Alta presión. Portable	a	1-2	Menos de 400	Al, Cu, Zn, Ag, etc.	<SM Kinetiks 2000>
Baja presión. Portable	Aire	Menos de 1	Menos de 600	Metal de bajo punto de fusión, utilizado en reparación	<OCPS (Rusia) DYMET 412, 403> <Centerline (Canadá) SST>
Baja presión. Sonico	He	Menos de 1	Menos de 400	Poco consumo de gas, controlado por una velocidad inferior a la del sonido	<Inovati (USA) KM-CDS, PCS, MCS>
Baja presión / alta temperatura	a		Menos de 900		<Medicoat (Suiza) ACGS>
Proceso de proyección inducido por ondas de choque (SISP)	He N	2	550-900	Al, Cu, SUS	Desarrollado por la Universidad de Ottawa en 2005)

SM: Sulzer Meteco (Truebbach, Suiza), II: Impact Innovations GmbH (Rattenkirchen, Alemania), PG: Plasma Giken Co. Ltd (Saitama, Japón), NIMS: National Institute for Materials Science (Tsukuba, Japón).

^a Nitrógeno, helio, aire o una mezcla de estos.

Tabla 4. Comparación de las características de los procesos HPCS y LPCS [8].

Parámetro	HPCS	LPCS
Gas de procesamiento	N ₂ , He, o una mezcla de estos	Aire (o N ₂ , He)
Presión	10-50 bar	6-10 bar
Temperatura de pre calentamiento del gas	800-1000 °C	650 °C
Tasa de alimentación del gas	0.85-2.5m ³ min ⁻¹ N ₂ Max 4.2 m ³ min ⁻¹ He	0.3-0.4 m ³ min ⁻¹
Tasa de alimentación del polvo	4.5-13.5 kg h ⁻¹	0.3-3 kg h ⁻¹
Distancia de rociado	10-50 mm	5-15 mm
Potencia eléctrica	17-47 kW	Max. 3.3 kW
Tamaño de partícula	1-50 μm	5-30 μm

Fuente: Tampere University of Technology

De la base de datos proporcionada en el software KSS®, rescatamos las boquillas con las que cuenta el software, estas se muestran a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Boquillas proporcionadas por la base de datos del Software KSS®.

Boquillas proporcionadas en el Software KSS®									
Marca	Tipo	Rin [m]	R* [m]	Ld [m]	Rel exp	Eficiencia	SOD min [m]	SOD max [m]	Equipos compatibles
CGT GmbH	D2st	0.007	0.00135	0.075	8.8	0.91	0.02	0.2	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D2WC	0.007	0.00135	0.075	8.8	0.91	0.02	0.2	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D24WC	0.007	0.00135	0.13	5.6	0.91	0.02	0.25	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D40WC	0.007	0.00135	0.18	7.6	0.91	0.02	0.25	K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D51WC	0.007	0.00165	0.18	6.4	0.93	0.02	0.3	K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D33PBI	0.007	0.00135	0.18	14.5	0.84	0.02	0.25	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
CGT GmbH	D42PBI	0.007	0.0019	0.11	4.4	0.94	0.02	0.3	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
HSU	HSU D29HC	0.007	0.00135	0.23	5.6	0.88	0.02	0.25	K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
HSU	HSU D33HC	0.007	0.00135	0.18	14.5	0.86	0.02	0.25	K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
HSU	HSU D50HC	0.007	0.0019	0.23	7.5	0.95	0.02	0.4	K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
HSU	HSU D52HC	0.007	0.00165	0.23	7.7	0.92	0.02	0.3	K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
HSU	HSU D53HC	0.007	0.0018	0.3	8.6	0.9	0.02	0.4	K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU
Centerline	Centerline 1	0.007	0.00135	0.115	3.8	0.9	0.01	0.05	Centerline
Dymet	DYMET 1	0.007	0.00135	0.115	3.8	0.9	0.01	0.05	Dymet 403K
Plasma Giken	PLASMA Giken X	0.005	0.0015	0.18	4.8	0.9	0.02	0.3	PCS-1000 PCS-800
Impact Innovations GmbH	OUT 1	0.006	0.00135	0.13	5.6	0.91	0.02	0.5	Impact Spray System 5/8 Impact Spray System 5/11 Impact Spray System 6/10
Impact Innovations GmbH	OUT 2	0.006	0.00135	0.068	10	0.91	0.02	0.5	Impact Spray System 5/8 Impact Spray System 5/11 Impact Spray System 6/10
Impact Innovations GmbH	OUT 4	0.006	0.00135	0.18	7.6	0.91	0.02	0.5	Impact Spray System 5/8 Impact Spray System 5/11 Impact Spray System 6/10

Principio de Funcionamiento del CS

Mecanismo de adhesión y formación de depósitos

En el proceso de CS, a diferencia de otros métodos de proyección térmica, el material no es fundido antes del impacto sobre el sustrato, por lo que la adhesión de las partículas en el CS se debe en su mayoría a su alta energía cinética que permite una alta deformación plástica de las partículas [32]. Se han identificado diferentes mecanismos para la formación del recubrimiento, aunque el mecanismo de la adhesión del CS aún no se ha comprendido del todo [20], sin embargo, previos trabajos de investigación consideran que la unión metalúrgica es la más adecuada para describir la unión entre partículas-sustrato, y partículas-partículas [7]. La unión metalúrgica es causada por el impacto o la adhesión por difusión basada en la inestabilidad de cizallamiento [20].

El proceso de formación de un depósito utilizando CS puede estar dividido en dos fases principales, primero, la formación de la primera capa, en donde tiene lugar la adhesión del depósito con el sustrato y posteriormente las capas adicionales que se van agregando para conformar el depósito [7]; de acuerdo con Van Steenkiste et al. [33]; sugiere que la formación del recubrimiento es un proceso de varios pasos, el cual consiste en la formación de la primera capa, seguida de la deformación y realineación de las partículas, la unión metalúrgica y la reducción de los vacíos del recubrimiento, Figura 18.

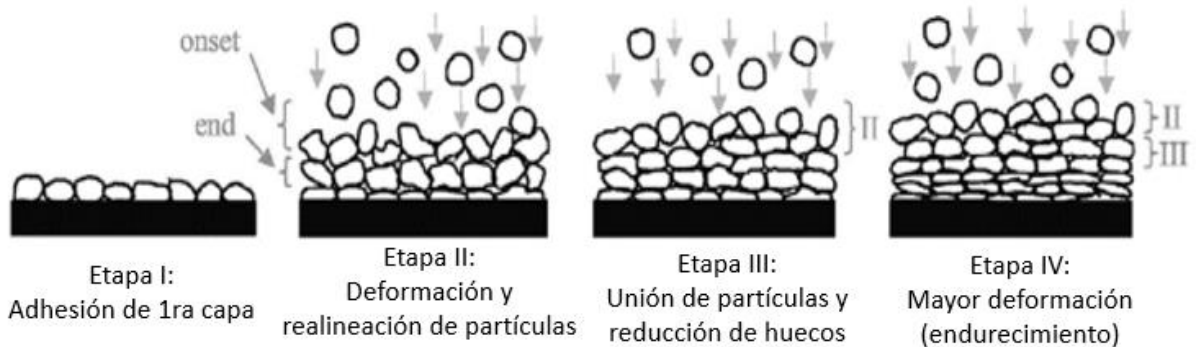


Figura 18. Etapas de la formación de un depósito en el proceso de CS [7].

Velocidad Crítica

Resultados de diversas investigaciones experimentales demuestran que la unión de las partículas en el proceso de CS sucede cuando la velocidad de impacto rebasa un valor crítico, al cual se conoce como velocidad crítica, esto quiere decir que las partículas deben alcanzar una velocidad mínima necesaria para lograr adherirse al sustrato. Ésta depende no sólo del tipo de material del polvo, sino también de sus propiedades termo-mecánicas, la calidad del polvo, el tamaño de las partículas y la temperatura de impacto de las mismas [13, 32, 34]. Además de los factores que se mencionan anteriormente, la velocidad de las partículas también depende directamente de la geometría de la boquilla, como se observa en la Ecuación (3), donde se relaciona la longitud de la sección divergente de la boquilla (L_d) [13].

La velocidad crítica de las partículas puede expresarse en termino de las propiedades del material y la temperatura de las partículas, según la Ecuación (1) [13, 34]:

$$v_{cr} = k_1 \sqrt{C_p(T_m - T_p) + 16 \frac{\sigma}{\rho_p} \left(\frac{T_m - T_p}{T_m - 293} \right)} \quad (1)$$

Donde:

k_1 es un parámetro de ajuste adimensional, el cual se encuentra en un rango de 0.5 a 0.6.

Diferentes autores han reportado la velocidad crítica de distintos materiales, basados en diferentes métodos descritos en sus trabajos [30], estas se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Evaluación de velocidad crítica de las partículas de diferentes materiales [30].

Velocidad umbral de las partículas (m/s)				
Material de la partícula	Material del sustrato	Assadi et al. (2003)	Análisis de elemento finito después de Grujic et al. (2004)	Factor de análisis SL después de Grujic et al. (2004)
Cobre	Cobre	570-680	575-580	571
Aluminio	Aluminio	760-770	760-770	766
Níquel	Níquel	600-610	620-630	634
316L	316L	600-610	620-630	617
Titanio	Titanio	670-680	650-670	657
Cobre	Aluminio	N/A	510-530	507
Aluminio	Cobre	N/A	600-630	634
Cobre	Níquel	N/A	570-580	571
Níquel	Cobre	N/A	570-580	576
Cobre	316L	N/A	570-580	574
316L	Cobre	N/A	570-580	573
Cobre	Titanio	N/A	520-550	514
Titanio	Cobre	N/A	570-590	582

Ventana de depósito

La ventana de depósito es un gráfico que muestra como varia la velocidad y temperatura de las partículas al impacto, muestra también, la velocidad crítica y la velocidad de erosión (Figura 19).

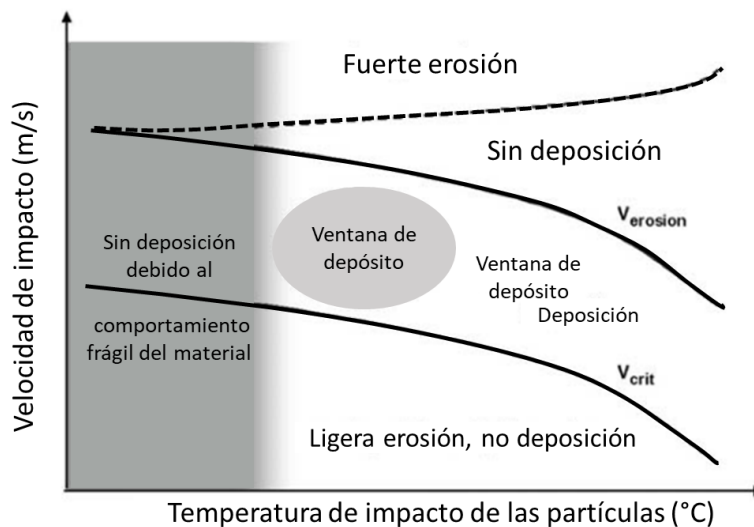


Figura 19. Velocidad VS temperatura de las partículas al impacto, ventana de depósito [34].

El área que se encuentra por debajo de la curva de la velocidad crítica, es el área de “no depósito”, significa la falta de adhesión o una ligera erosión. Por encima de la curva de la velocidad de erosión se encuentra una fuerte erosión, o bien, en caso de que se utilicen partículas, esta área indicaría la ausencia de depósito o adhesión. La zona que se encuentra entre las curvas de velocidad crítica y velocidad de erosión es la ventana de depósito. Se espera que en la región entre estas dos curvas la mayoría de las partículas sean depositadas [34].

Mapas de selección de parámetros

Assadi et.al, sugieren que las características del recubrimiento pueden considerarse como un parámetro adimensional, el cual se define como la relación entre la velocidad de impacto de las partículas y la velocidad crítica [13], de la siguiente manera, Ecuación (2):

$$\eta = \frac{v_{pi}}{v_{cr}} \quad (2)$$

Donde v_{pi} y v_{cr} , son la velocidad de impacto y la velocidad crítica, respectivamente.

La relación η , se expresa en función del material de las partículas, y otros parámetros de procesamiento, tales como el tamaño de partículas, la temperatura y presión del gas, condiciones de rociado, así como la geometría de la boquilla empleada [13].

Por ejemplo, en el estudio realizado por Assadi et. al, muestra que, para el material empleado en su trabajo, las condiciones de rociado y la boquilla utilizada, η se puede expresar de la siguiente manera, según la Ecuación (3):

$$\eta \cong \left[\frac{v_{cr}^{ref}}{a_{ref}} \left(\frac{d_p}{d_p^{ref}} \right)^{-0.18} \sqrt{1 - \frac{T_{pi}}{T_m}} \left(1 + 0.32 \sqrt{\frac{C_d L_d \rho_0 (1+k)}{\rho_p d_p k R T_0}} \right) x \left(1 + \frac{\rho_0 \delta}{R T_0 d_p} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

En esta ecuación se consideran todos los parámetros clave que influyen en el proceso de CS, entre ellos la longitud de la zona divergente de la boquilla (L_d).

Con la ecuación (3) se pueden construir los mapas de selección de parámetros, los cuales pueden mostrar η en función de diferentes variables, tales como: ρ_0 , T_0 y d_p y una combinación de estas, como ejemplo se muestra la Figura 20, [13].

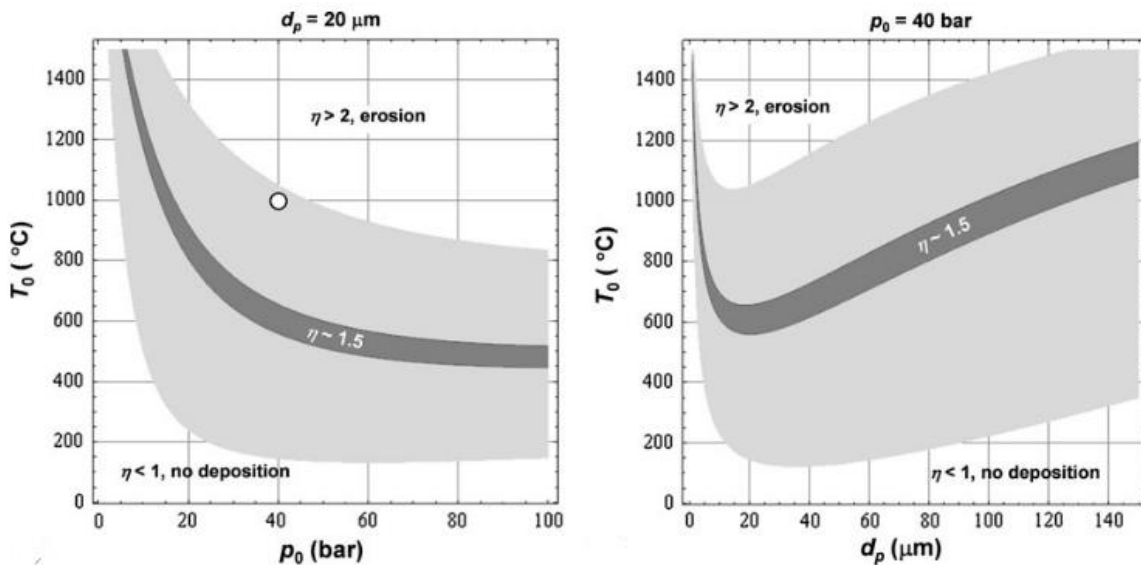


Figura 20. Ejemplos de mapas de selección de parámetros, en función de: la temperatura, presión de estancamiento y diámetro de partícula [13].

Efectos de los parámetros de procesamiento en la aceleración de las partículas y el proceso de CS

De acuerdo a la experiencia adquirida a través de los estudios y experimentos que se han realizado sobre la tecnología del CS, se ha logrado identificar que la formación exitosa de un recubrimiento o depósito depende principalmente de la velocidad de las partículas al impacto contra el sustrato. Y a su vez, la velocidad de las partículas depende de distintos factores tales como la velocidad, la temperatura, presión y tipo de gas utilizando; el tamaño de las partículas y su naturaleza; así como el diseño de la boquilla empleada, lo cual incluye: diámetros de la entrada, garganta y salida, así como la las longitudes de las secciones convergente y divergente[7], [13]. Estos efectos se describen a continuación, de manera general.

Efecto del tamaño de partícula

Se observa en la Figura 21, que la velocidad de las partículas disminuye cuando aumenta el diámetro de las partículas, bajo las diferentes condiciones de rociado, temperatura y presión del gas empleado.

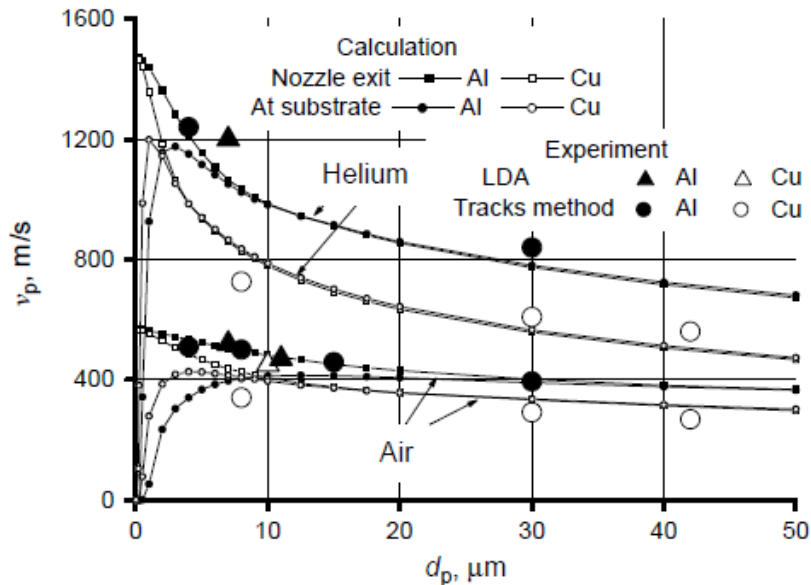


Figura 21. Velocidades calculadas de partículas de aluminio y cobre a la salida de la boquilla y en la superficie del sustrato en función del tamaño de las partículas, comparadas con los resultados experimentales. $L = 100\text{mm}$, $P_o = 20\text{MPa}$ [26].

Efecto del tipo de gas utilizado

Comúnmente en el proceso de CS es utilizado el Nitrógeno como gas de arrastre, este se emplea principalmente el proceso de alta presión (HPCS) para una amplia gama de materiales, sin embargo, en ocasiones es necesario utilizar Helio para materiales duros, que requieren alcanzar una mayor velocidad. El aire es utilizado en la mayoría de los sistemas de baja presión (LPCS), siendo el aire el gas con el que se alcanzan menores velocidades de

las partículas. Aunque, el Helio permite alcanzar mayores velocidades y mejorar la eficiencia de depósito, su costo es mayor que el del Nitrógeno, por lo que no es viable económicamente, a menos que se utilice un sistema de reciclaje o recuperación del gas [31].

Efecto de la temperatura

La velocidad del gas dentro de la tobera también es una función de su temperatura, como se observa en la Ecuación (20). De esto se deduce que la velocidad de las partículas aumenta con el incremento de la temperatura del gas. Sin embargo, aunque una mayor temperatura del gas proporciona una mayor velocidad de las partículas, también aumenta el riesgo de oxidación, efecto indeseable. Así mismo, también, a temperaturas más elevadas la densidad y la viscosidad del gas disminuirán y, por lo tanto, la fuerza de arrastre del gas, disminuyendo la aceleración de las partículas [31].

Efecto del diseño de las boquillas

La velocidad de las partículas también se ve influenciada por el diseño de la tobera, los diámetros de entrada, garganta y salida, o la relación de expansión (es decir, la relación entre el área de la salida y la garganta), la longitud de la sección convergente y divergente [31].

La Figura 22, muestra el efecto de la boquilla sobre la velocidad y temperatura de las partículas, se observa que para cada condición específica existe una longitud divergente que es óptima, la cual garantiza la aceleración máxima de las partículas. Esto sucede porque cuando la longitud de la sección divergente sigue aumentando, esta causa la disminución en la velocidad del gas y en consecuencia la desaceleración de las partículas [35].

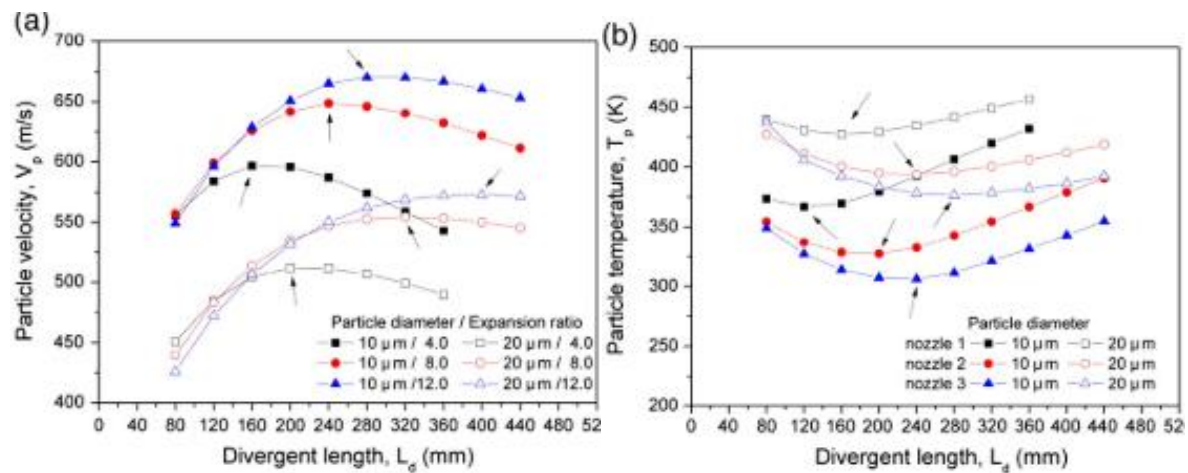


Figura 22. (a) Velocidad de impacto de las partículas y (b) temperatura de impacto, en función de la longitud divergente [35].

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los parámetros que afectan las principales condiciones de impacto.

Tabla 7. Resumen del efecto de los parámetros de procesamiento en las condiciones de impacto [36], [13].

Factor	Parámetro	Efecto en V_p	Efecto en T_p	Efecto en T_{subs}	Efecto en V_{cr}
Gas	Tipo	$V_p(He) > V_p(N_2)$	$T_p(He) < T_p(N_2)$		
	T_{gas}	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow$	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow T_{subs} \uparrow$	
	P_{gas}	$P_{gas} \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow$	$P_{gas} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow \downarrow$		
Boquilla	Longitud, l	$l \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow$	$l \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$l \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	
	Rel. Exp., r	$r \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow$	$r \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$r \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	
	Diámetro, d	$d \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow$			
Pre cámara	Longitud, l_{pre}		$l_{pre} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$		
Procedimiento	Distancia de rociado, s	$s \uparrow \Rightarrow V_p \uparrow \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	
	Angulo de rociado, ω	$\omega \uparrow \Rightarrow V_p \downarrow$			
	Velocidad del robot, v_{gun}			$v_{gun} \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	
	Tasa de alimentación del polvo, f	$f \uparrow \Rightarrow V_p \downarrow$	$f \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$	$f \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	
Material a depositar	Resistencia, σ				$\sigma \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
	Densidad, ρ	$\rho \uparrow \Rightarrow V_p \downarrow$	$\rho \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$		
	Temperatura de fusión, T_m				$T_m \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
	Calor específico, C_p		$C_p \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$		$C_p \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
Material del sustrato	Conductividad, k			$k \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	$k \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
	Calor específico, C_p			$C_p \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	$C_p \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
	Efusividad, e			$e \uparrow \Rightarrow T_{subs} \downarrow$	$e \uparrow \Rightarrow V_{cr} \uparrow$
Polvo	Tamaño de partícula, d_p	$d_p \uparrow \Rightarrow V_p \downarrow$			$d_p \uparrow \Rightarrow V_{cr} \downarrow$
	Temperatura de partícula, T_p				$T_p \uparrow \Rightarrow V_{cr} \downarrow$

Problemas relacionados con la geometría de Laval en el Cold Spray

El uso de las boquillas convergentes-divergentes, que es un dispositivo clave en el proceso de CS, también puede representar problemas, como obstrucción o presencia de ondas de choque, lo que provoca una disminución en la eficiencia de la boquilla, y en la velocidad de impacto de las partículas, lo que propicia depósitos porosos, con mala adhesión, o bien, que las partículas solo reboten en la superficie del sustrato causando la erosión de la superficie[37][38]. A continuación, se abordan estos problemas de forma general.

Obstrucción de boquillas (Nozzle clogging)

La obstrucción de las boquillas del proceso de CS, es consecuencia de la aglomeración de partículas en la superficie interior de las boquillas. Este problema se presenta cuando las partículas que fluyen a altas velocidades dentro de la boquilla, impactan contra las paredes de esta y se quedan adheridas a la superficie; obstruyendo el flujo adecuado del gas y las

partículas. Dos factores que propician el problema de la aglomeración son: el uso de partículas con un bajo punto de fusión, o bien, cuando éstas se encuentran precalentadas; así como la alta temperatura de las paredes de la boquilla, principalmente en la región cercana a la garganta en la sección divergente [39].

La aglomeración de las partículas dentro de la boquilla disminuye considerablemente su eficiencia, lo cual repercute en la calidad del depósito, por ejemplo, causa el incremento de la porosidad de los depósitos o recubrimientos fabricados[36, 37], observe la Figura 23.

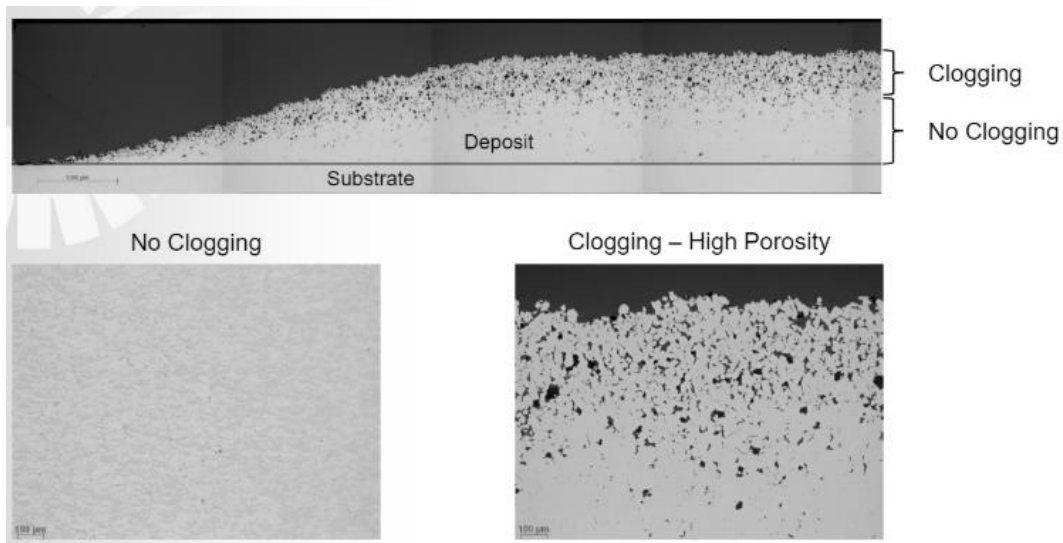


Figura 23. Comparación de la porosidad de un depósito, en consecuencia, de la obstrucción de la boquilla [40].

Dada la importancia de las consecuencias causadas por la aglomeración de partículas, se han hecho esfuerzos mediante diferentes trabajos de investigación, con el fin de erradicarlo; por ejemplo, algunos trabajos [35, 36] presentan sistemas de enfriamiento con el objetivo de disminuir la temperatura de las paredes de la boquilla y con esto evitar que las partículas se adhieran al impactar contra la pared interna de la boquilla, como se observa en la Figura 24, una camiseta de enfriamiento para una boquilla de CS.



Figura 24. Boquilla de CS con dispositivo de enfriamiento [39].

Por otro lado, se ha estudiado la factibilidad de utilizar un campo eléctrico para guiar y corregir la dirección de las partículas dentro de la boquilla y así evitar que estas choquen contra la pared de la boquilla [41].

Ondas de choque

La relación de presiones en las diferentes secciones de la boquilla define cómo será el flujo a través de ésta. Estas condiciones también determinan la posibilidad de la aparición de ondas de choque dentro de la boquilla[42]. La Figura 25, ilustra cómo la presión de estancamiento afecta el flujo a través de la boquilla de Laval.

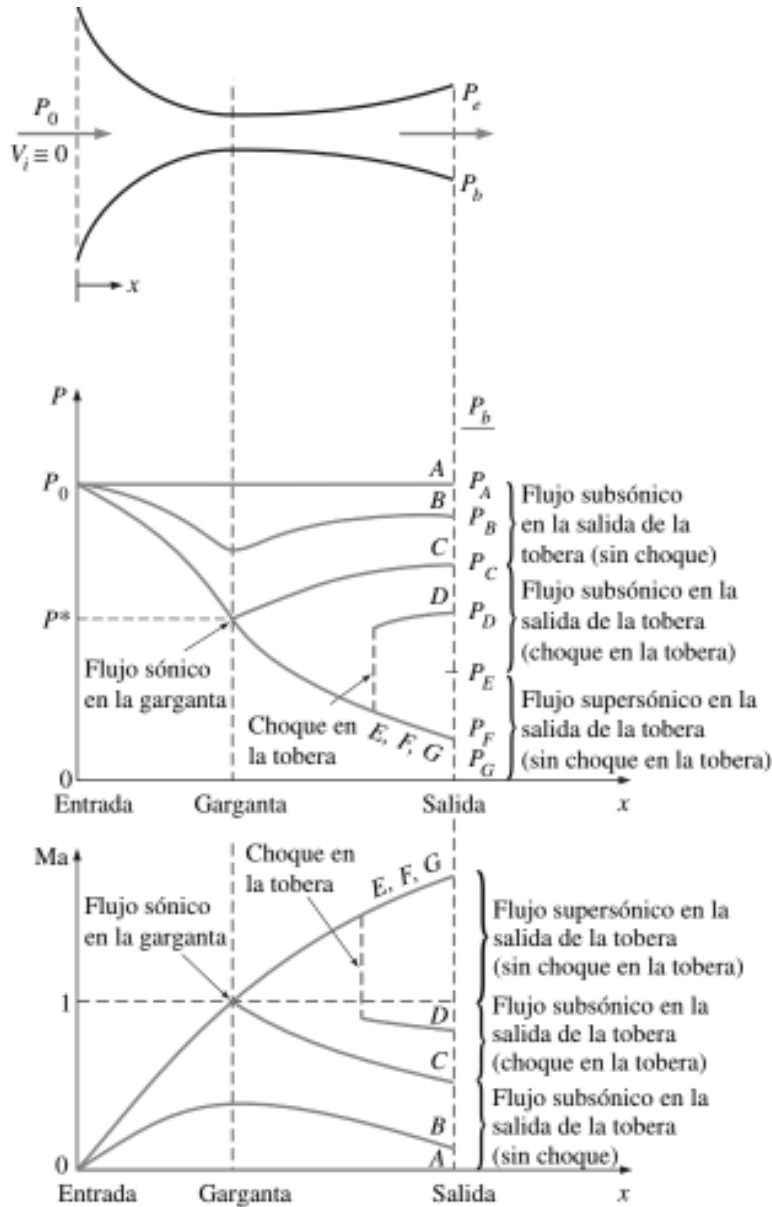


Figura 25. Flujo a través de una boquilla de Laval [42][38].

Considerando que la presión ambiente es constante e igual a la presión atmosférica, se realiza el análisis del comportamiento del flujo dentro de la boquilla [38], descrito a continuación.

Si la presión de estancamiento es tan baja que no se cumple la condición crítica para alcanzar la velocidad del sonido en la sección de la garganta, la velocidad del gas será

subsónica en toda la boquilla (A y B). Un caso extremo es que se encuentre la condición crítica en la garganta (es decir que, en esta zona se alcance la velocidad del sonido) pero en la parte divergente baje a velocidad subsónica (C). Las situaciones A, B y C no se presentan en el proceso de CS. En segundo lugar, a medida que la presión de estancamiento aumenta gradualmente, el gas comienza a ser supersónico en la parte divergente. Sin embargo, las ondas de choque normales se generarán en la parte divergente, lo que resulta en la reducción repentina de la velocidad del gas (de supersónica a subsónica) en esta zona de choque (D, E y F). En tercer lugar, al aumentar aún más la presión de estancamiento, las ondas de choque normales desaparecen. En cambio, el gas se mantiene supersónico en la parte divergente hasta la región de salida de la tobera, donde se generan los mencionados choques oblicuos y las ondas de expansión (G, H e I). Finalmente, a medida que aumenta la presión de estancamiento, el flujo exterior se mantiene subexpandido (I). En este caso, la presión ambiente ya no afecta al flujo dentro de la tobera, lo que significa que la relación entre la presión de estancamiento y las propiedades del flujo dentro de la tobera seguirá siendo aproximado como isentrópico unidimensional y, por tanto, la velocidad del gas a la salida de la tobera se mantendrá constante [38], [42].

La relación de expansión de la boquilla es un aspecto muy importante en el diseño de una boquilla de CS. En teoría, de acuerdo con la ecuación (18), una mayor relación de expansión permite un mayor número de Mach, y en consecuencia una mayor velocidad del gas, independientemente de la presión de estancamiento [38].

Sin embargo, se observa que la presión de estancamiento afecta significativamente al flujo dentro y fuera de la boquilla. El número de Mach y la velocidad del gas a la salida de la tobera aumenta con la relación de expansión, cuando la presión de estancamiento es lo suficientemente alta como para que la presión ambiente a la salida, no afecte el flujo dentro de la tobera y se presenten ondas de choque [7], [38].

Una tobera con una gran relación de expansión es capaz de producir una alta velocidad del gas, pero requería una presión de estancamiento suficientemente alta [35].

Además, la longitud divergente de la tobera también afecta a la velocidad del gas, cuando el número de Mach a la salida de la tobera disminuye a medida que aumenta la longitud divergente, debido a la mayor disipación de energía causada por la sección divergente más larga [35].

Cuando el gas llega a la parte divergente, su velocidad sigue aumentando continuamente hasta la región cercana a la salida, donde pueden generarse ondas de choque debido al cambio en la presión [38]. La Figura 26, muestra el flujo típico del gas dentro de la parte divergente de la tobera y fuera de la tobera sin la aparición de sustrato, siendo afectado por la geometría de la boquilla. Se puede tratar de un flujo sub-expandido, correctamente expandido y sobre-expandido.

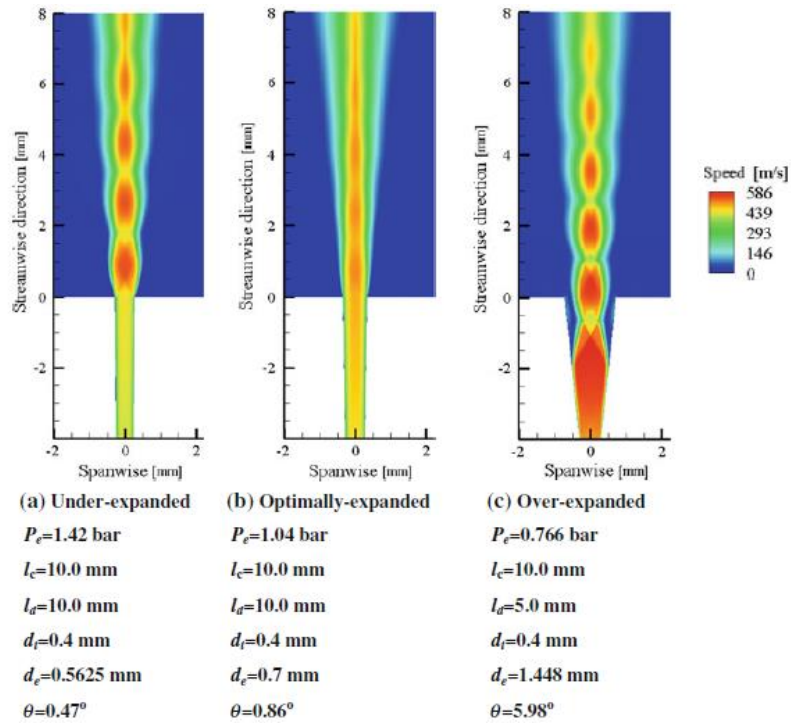


Figura 26. Efectos de la geometría de la boquilla en las características de un flujo supersónico, cuando la presión de salida es de 1 bar [43]

Así mismo, otro efecto debido a las ondas de choque, se presenta cuando el flujo que sale por la boquilla choca contra el sustrato, se trata del “bow shock” o choque de arco Figura 27, el cual genera una región de alta densidad, alta presión y baja velocidad; que ocasiona que la velocidad del gas se reduzca repentinamente (de supersónica a cero) dentro del arco de choque, en consecuencia, esto provoca la desaceleración de las partículas debido al aumento del arrastre en esta zona [38]. Dado que la velocidad de impacto de las partículas controla directamente la eficiencia de depósito y la calidad de este, la aparición de este arco de choque significa un problema para el proceso de CS [43]. Estudios han revelado que esta condición se ve influenciada también por la distancia de rociado utilizada [44].

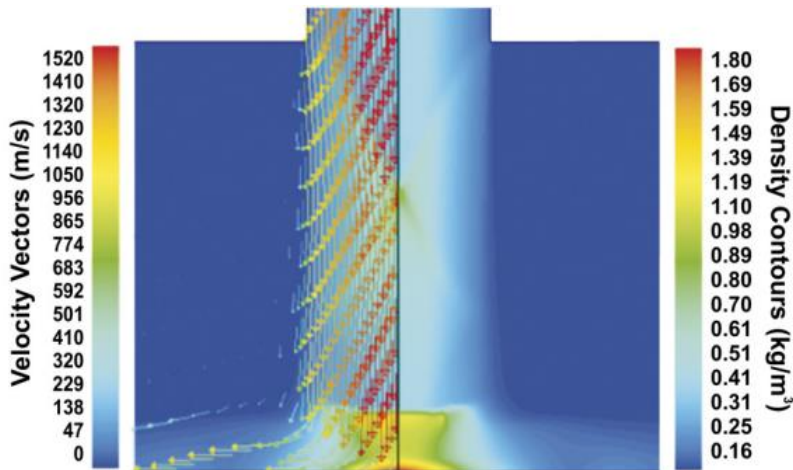


Figura 27. Imagen CFD de la zona de impacto a una distancia de separación de 10 mm [44].

Ecuaciones y principios gobernantes del proceso de Cold Spray

Existen ecuaciones y principios gobernantes que describen analíticamente el proceso de CS, analizando la interacción entre el gas de arrastre y las partículas, considerado como un flujo bifásico diluido, el cual se mueve a través de una boquilla de Laval. Para introducir estas ecuaciones es necesario comprender algunos conceptos termodinámicos y fenómenos físicos, estos conceptos y ecuaciones se pueden encontrar en los libros: “Mecánica de Fluidos” de Frank White[45] y “Calor y Termodinámica” de Richard Zemansky [46].

Flujo supersónico

En el proceso de CS los gases de procesamiento deben alcanzar altas velocidades, del orden supersónico, las cuales son alcanzadas gracias a la configuración geométrica de la boquilla de Laval (también conocida como tobera) o convergente-divergente [47].

Cuando un fluido se mueve a velocidades supersónicas presenta una variación de densidad, lo cual implica también variaciones importantes en la temperatura y presión. Este tipo de flujo es estudiado por una combinación de mecánica de fluidos clásica y termodinámica clásica, lo cual resulta en “dinámica de gases”, y requiere de cuatro ecuaciones fundamentales para su resolución, estas son:

1. Ecuación de continuidad
2. Ecuación de la cantidad de momento
3. Ecuación de la energía
4. Ecuación de estado

Al resolverse simultáneamente las ecuaciones anteriores, se puede conocer la presión, densidad, temperatura y velocidad del flujo (p, ρ, T, V). Sin embargo, se pueden hacer simplificaciones importantes, tal como considerar un flujo adiabático reversible o isentrópico para facilitar el cálculo de este tipo de flujos [45].

Cuando un fluido se mueve a bajas velocidades se puede considerar incompresible, es decir, se puede despreciar la compresibilidad inherente a cualquier fluido real, sin embargo, cuando se mueve a altas velocidades, puede variar su densidad y con ello convertirse en un fluido compresible [45]. Lo mismo sucede en la dinámica de gases, donde las velocidades cercanas o más altas que la velocidad del sonido local pueden hacer que el flujo de gas sufra gradientes de presión lo cual genera variaciones de densidad del gas que deben ser tomadas en consideración [47].

A continuación, se presentan principios y ecuaciones que son necesarias para modelar las características del gas a lo largo de la boquilla de Laval; primero obteniendo un modelo para el gas y posteriormente un modelo para el movimiento de las partículas en el flujo de gas.

Número de Mach

El número de Mach (local) se define como la relación entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el fluido, según la Ecuación (4):

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (4)$$

En donde V [m/s] es la velocidad del flujo y a [m/s] es la velocidad del sonido en el fluido.

El número de Mach es un parámetro de suma importancia en el análisis de los flujos compresibles. Para medios externos se habla de una clasificación de al menos cinco categorías de flujo (incompresible, subsónico, transónico, supersónico e hipersónico), sin embargo, para cuando se estudian flujos internos (conductos, boquillas, etc.), la cuestión más importante es si el flujo es subsónico ($Ma < 1$) o supersónico ($Ma > 1$) [45].

La densidad del fluido no es la única variable que se ve afectada cuando el flujo aumenta su velocidad y cuando se encuentra en el régimen supersónico. La temperatura y presión de estancamiento también varían significativamente tal como se observa en la Figura 28.

Es importante aclarar que el término “estancamiento” se utiliza para denotar la presión y temperatura antes de la entrada a la boquilla, es decir, antes de la zona convergente de una boquilla de Laval.

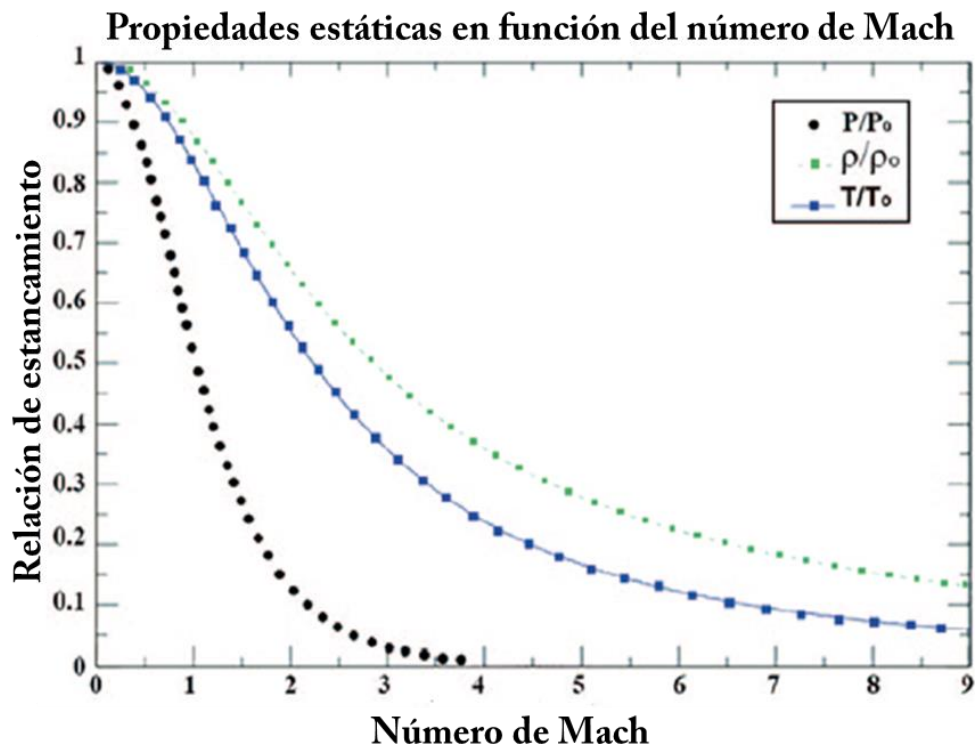


Figura 28. Relación estática/de estancamiento de la presión, la densidad y la temperatura en función del número de Mach del flujo [47].

Calores específicos

El cálculo de flujos compresibles depende, además de la geometría y número de Mach, de la relación de calores específicos del gas, número adimensional que se define en la Ecuación (5):

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (5)$$

Donde γ es la relación de calores específicos, C_p es el calor específico de un gas a presión constante [$Jkg^{-1}K^{-1}$] y C_v el calor específico de un gas a volumen constante [$Jkg^{-1}K^{-1}$]

Capacidad calorífica

Si un sistema experimenta un cambio de temperatura de T_i a T_f durante la transferencia de Q unidades de calor, se define como capacidad calorífica media del sistema, Ecuación (6):

$$C = \frac{Q}{T_f - T_i} \quad (6)$$

Siendo Q la cantidad de calor transferido [J] y $T_f - T_i$ temperatura final e inicial, respectivamente.

Si tanto Q como $T_f - T_i$ se hacen pequeños, esta razón tiende hacia el valor instantáneo de la capacidad calorífica C , Ecuación (7).

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (7)$$

En el caso de un sistema hidrostático, la razón $\frac{\delta Q}{dT}$ tiene un valor único cuando se mantiene constante la presión. En estas condiciones, C se denomina capacidad calorífica a presión constante y se presenta por C_p , siendo (Ecuación 8):

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p \quad \text{Donde } C_p \text{ depende de } P \text{ y } T \quad (8)$$

De forma similar, la capacidad calorífica a volumen constante (Ecuación 9) es:

$$C_v = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_v \quad \text{Donde } C_v \text{ depende de } V \text{ y } T \quad (9)$$

Formulación matemática del primer principio de la termodinámica

“La energía de un sistema es igual a la suma del calor o energía agregados, más el trabajo realizado sobre el sistema” de acuerdo a la Ecuación (10):

$$U_f - U_i = Q + W \quad (10)$$

Donde U_i y U_f , son la energía interna inicial y final, respectivamente; W es el trabajo realizado sobre el sistema.

La ecuación (10) constituye el primer principio de la termodinámica. Debe destacarse que esta formulación contiene tres ideas afines: (1) La existencia de una función de energía interna; (2) el principio de la conservación de la energía, y (3) la definición de calor como energía en tránsito en virtud de una diferencia de temperatura [46].

Cuando el flujo de gas se encuentra en el régimen supersónico tanto la presión como la temperatura y en consecuencia la densidad, experimentan variaciones importantes. Este comportamiento se puede entender mejor si se considera la primera ley de la termodinámica aplicada a un volumen de control infinitesimal a través del cual se acelera un gas de forma adiabática (sin transferencia de calor) y reversible (sin fricción). Suponiendo que este proceso ocurre en un estado estacionario (sin cambio en el tiempo de ninguna propiedad del fluido en el volumen de control), la primera ley la podemos expresar de la siguiente manera, Ecuación (11):

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (11)$$

Donde h es la entalpia local y v es la velocidad local del gas. Esta ecuación asegura que la energía se conserva cuando se asume el flujo adiabático reversible en estado estacionario.

Ecuación de la conservación de la cantidad de momento

La conservación de la cantidad de momento es un concepto fundamental de la física junto con la conservación de la energía y la conservación de la masa. El momentum está definido como la masa de un objeto multiplicada por la velocidad del objeto, el momentum solo cambia mediante la acción de fuerzas, como se describe en las leyes de movimiento de Newton [48].

Para ilustrar la conservación de momentum se considera un problema de flujo muy simplificado, donde las propiedades solo cambian en una dirección, el flujo constante (es decir, que no cambia con el tiempo) y solo se consideran las fuerzas asociadas con la presión. De la siguiente manera (Figura 29):

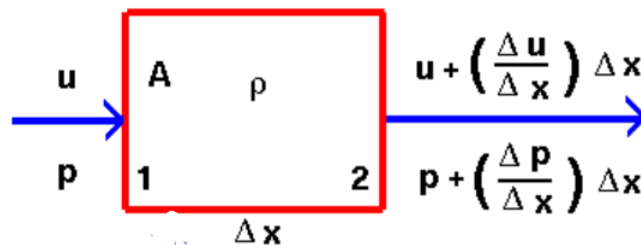


Figura 29. Consideración del flujo de un gas a través de un dominio. Fuente: NASA – Conservation of Momentum.

La ecuación de conservación de momentum se expresa de la siguiente manera en su forma diferencial, Ecuación (12):

$$-\frac{dp}{dx} = \rho u \frac{du}{dx} \quad (12)$$

En la ecuación (12) el signo negativo del lado izquierdo indica que los gases se mueven de una región de alta presión a una región de baja presión; si la presión aumenta a medida que avanza el fluido, entonces la velocidad disminuirá.

Flujo Isentrópico

Un flujo es isentrópico cuando es reversible y adiabático, es decir, su entropía permanece constante, debido a que se considera que no hay transferencia de calor y se desprecia la fricción durante el proceso. Algunos ejemplos de esta consideración son la circulación de un fluido a través de toberas, difusores y los espacios entre los álabes de las turbinas; se considera unidimensional cuando las características numéricas de flujo varían principalmente en una sola dirección [41, 46].

Relaciones Isentrópicas

Las relaciones isentrópicas, como su nombre lo indica, son capaces de calcular flujos considerados como isentrópicos; permiten conocer cómo se relacionan la temperatura, presión y densidad del fluido, cuando pasan entre dos puntos, estas dependen de la relación de calores específicos (γ). Las relaciones se muestran en la Ecuación (13):

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\gamma} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\gamma(\gamma-1)} \quad (13)$$

Donde, P, V y T representan la presión, volumen, y temperatura respectivamente. Los subíndices 1 y 2, representan los tiempos o escenarios del sistema, por ejemplo, puede representar la garganta y salida de una boquilla de Laval.

Flujo en una boquilla de Laval (convergente-divergente)

De acuerdo con los estudios realizados anteriormente sobre la dinámica de gases, se sabe que para acelerar un flujo a velocidades supersónicas es necesario utilizar un conducto convergente divergente, también conocido como boquilla o tobera de Laval [47].

Una boquilla de Laval (Figura 30) está conformada por una sección convergente y una divergente. Entre estas dos secciones se encuentra la sección de área más pequeña, la cual es llamada garganta. El flujo es acelerado o desacelerado debido al cambio de las áreas de flujo y la compresión del gas.

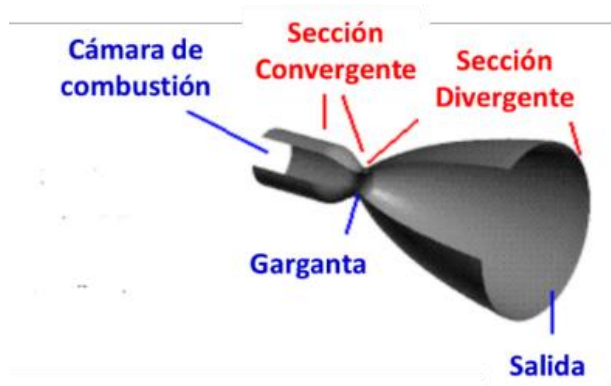


Figura 30. Boquilla o Tobera de Laval. Fuente: NASA-Nozzle Design.

La Ecuación (14) describe la relación entre el cambio de la velocidad del fluido y el cambio de área en un flujo de un gas dentro de una tobera de Laval [42][49].

$$-M^2 \frac{dV}{V} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (14)$$

O bien:

$$\left(\frac{dV}{V}\right) (1 - M^2) = -\left(\frac{dA}{A}\right) \quad (15)$$

La Ecuación (15) describe lo siguiente:

- Para un flujo subsónico ($M < 1$), el incremento en el área ($dA > 0$) causará que la velocidad del flujo decrezca ($dV < 0$).
- Para un flujo supersónico ($M > 1$), el incremento en el área ($dA > 0$) causará que la velocidad del flujo se incremente ($dV > 0$).

Dinámica de flujo del gas en CS

En el proceso de CS, el gas es el medio por el cual las partículas inyectadas se aceleran y obtienen energía térmica y cinética. En consecuencia, es el gas el que limita la velocidad máxima de las partículas, y representa un parámetro clave junto con el diseño de las boquillas de Laval para generar un flujo supersónico, con el que las partículas superen la velocidad crítica y logren depositarse de forma eficiente.

Aunque la velocidad del gas y de las partículas puede ser aumentada utilizando gases con bajo peso molecular, altas temperaturas y boquillas con una gran relación de expansión, existen prácticas limitantes para las variables en el proceso[50].

El efecto de los diferentes parámetros del proceso de CS en la velocidad de las partículas en vuelo puede ser investigado de forma experimental y teórica, mediante diferentes modelos, desde los analíticos más simples hasta modelos complejos de dinámica de fluidos computacional. A continuación se aborda un modelo analítico, planteado por R.C Dykhuizen y M.F. Smith, en 1998 [50].

Relaciones críticas dentro de la boquilla de Laval

Las condiciones críticas dentro de la boquilla de Laval se presentan en la garganta (la sección con área más pequeña) donde se espera que el gas alcance velocidades supersónicas.

Mediante el uso de las relaciones isentrópicas (Ecuaciones 16-19) es posible establecer las relaciones entre las condiciones de estancamiento y las condiciones críticas (en la garganta) de la boquilla, conociendo así las condiciones críticas de temperatura, velocidad del sonido, presión y densidad.

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma + 1} \text{ Relación de temperaturas} \quad (16)$$

$$\frac{a^*}{a_0} = \sqrt{\frac{2}{\gamma + 1}} \text{ Relación de velocidades} \quad (17)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \text{ Relación de presiones} \quad (18)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \text{ Relación de densidades} \quad (19)$$

Donde T, a, P, ρ, γ , son la temperatura, velocidad, presión, densidad y relación de calores específicos; respectivamente. El sub índice "0", representa las variables en la zona de estancamiento, es decir, a la entrada de la boquilla. Mientras que el super índice "*" representa las variables en la zona de la garganta de la boquilla.

En las ecuaciones anteriores, los valores de γ (relación de calores específicos), es de 1.66 para gases monoatómicos y 1.4 para gases diatómicos [50].

Considerando que, en la garganta de la tobera, el número de Mach es igual a la unidad, entonces la velocidad del gas en la garganta puede ser calculada mediante la Ecuación (20):

$$V^* = \sqrt{\gamma RT^*} \quad (20)$$

Donde V^* y T^* son la velocidad y temperatura en la garganta, respectivamente, R es la constante de los gases ideales.

De lo anterior, es posible deducir porque el helio se considera como el mejor gas de arrastre debido a su bajo peso molecular y alta relación de calor específico (γ).

Relación entre Área y Numero de Mach

Para completar los cálculos de la dinámica de flujo del gas, se debe especificar alguna condición de salida, como por ejemplo la presión de salida, el número de Mach de salida o bien, el área de salida.

Si se conoce el área de salida, se puede obtener el número de Mach mediante la Ecuación (21).

$$\frac{A}{A^*} = \left(\frac{1}{M}\right) \left[\left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)\right]^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} \quad (21)$$

Mediante la ecuación anterior se obtiene el valor del número de Mach del gas en cualquier lugar dentro de la boquilla como función del área de la boquilla y el área de la garganta.

Una vez que se conoce el número de Mach, las Ecuaciones (22-25) permiten conocer las condiciones en diferentes zonas de la boquilla mediante las siguientes relaciones isentrópicas.

$$\frac{P}{P^*} = \left(\frac{\gamma+1}{2+(\gamma-1)M^2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (22)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (23)$$

$$V = M\sqrt{\gamma RT} \quad (24)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{1/(\gamma-1)} \quad (25)$$

Para obtener la máxima velocidad de las partículas se requiere que la presión de salida se encuentre por debajo de la presión ambiente, para esto se requiere que el flujo sea sobreexpandido, esto se puede corroborar con la Ecuación (26), ya que la presión de salida calculada debe ser menor a la presión del ambiente.

$$\frac{P_s}{P_e} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_e^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (26)$$

P_s [MPa] es la presión en la zona divergente de la tobera que se obtendría si se genera una onda de choque en la salida de la tobera. P_e [MPa] y M_e son la presión y el número de Mach a la salida de la tobera, respectivamente.

Velocidad de las partículas

Una vez establecido el modelo para el flujo del gas es posible establecer el modelo para el movimiento de las partículas, para esto se asume que el flujo bifásico está lo suficientemente diluido (es decir, que la cantidad de partículas en el flujo es lo suficientemente pequeña para no considerarla), de manera que las ecuaciones anteriores que describen la dinámica de gases se conservan. La aceleración de la velocidad de las partículas puede ser equivalente a la fuerza de arrastre sobre la partícula, de la siguiente manera, Ecuación (27):

$$m \frac{dV_p}{dt} = mV_p \frac{dV_p}{dx} = \frac{C_D A_p \rho (V - V_p)^2}{2} \quad (27)$$

Donde m , V_p y A_p , son la masa, velocidad y área de la sección transversa de las partículas, respectivamente; V y ρ , son la velocidad y densidad del gas, respectivamente.

La velocidad de las partículas es obtenida de forma simplificada en la Ecuación (28), para valores bajos de la velocidad de las partículas comparadas con la velocidad del gas:

$$V_p = V \sqrt{\frac{C_D A_p \rho x}{m}} \quad (28)$$

Donde x , es la posición axial dentro de la boquilla.

Las ecuaciones de dinámica del gas revelan que la densidad del gas disminuye a medida que la velocidad del gas aumenta a través de la tobera. Por lo tanto, existe una condición óptima que produce una aceleración máxima que corresponde a condiciones en las que se ejerce una fuerza de arrastre máxima sobre la partícula [50]. Esta última puede estimarse diferenciando el lado derecho de la ecuación de la fuerza de arrastre con respecto a la presión (o a la temperatura, ya que están relacionadas con el flujo isentrópico)[50].

$$\frac{dD}{dP} = C_D A_p \left(\frac{M^2}{2} - 1 \right) \quad (29)$$

La Ecuación (29) muestra que la velocidad relativa del gas con un número de Mach igual a $\sqrt{2}$, permite que la densidad del gas sea óptima y que, por lo tanto, la velocidad del gas maximice la aceleración de las partículas [50].

Revisión de la Literatura

En 1998 R.C Dykhuizen y M.F. Smith [50] presentan por primera vez un modelo analítico para estimar la dinámica de flujo del gas, así como la velocidad de las partículas en vuelo en el proceso de CS, dentro de la tobera. Los modelos de ecuaciones siguen este orden: primero se introduce un modelo para el flujo de gas, el cual se considera isentrópico (adiabático y sin fricción) y unidimensional, el cual se aproxima a un gas perfecto con calores específicos constantes. Posteriormente se introduce un modelo para conocer el flujo de las partículas. A partir de la condición de flujo del polvo se identifican las condiciones óptimas que permiten la máxima aceleración de las partículas, y con ello, las ecuaciones que describen la forma óptima de la tobera. Finalmente, se calcula de forma analítica la velocidad de las partículas que se obtiene con la geometría óptima de la tobera. Se realizaron cálculos con dos tipos de gas (aire y helio). Los resultados muestran que la velocidad de las partículas depende de las características de la partícula (tamaño y densidad), presión de estancamiento, temperatura total y peso molecular del gas, así como la geometría de la tobera que sea óptima para el proceso de CS.

Posteriormente en el año 2000, A.P. Alkhimov y colaboradores [51] estudiaron el efecto de dos fenómenos físicos que afectan directamente la dinámica de flujo del gas y por ende la

velocidad de las partículas, los cuales son despreciados en el análisis realizado por Dykhuizen y Smith [50]. Se trata de la presencia de la capa límite a lo largo de las paredes dentro de una boquilla con sección transversal rectangular, y la región de baja velocidad y alta presión que ocurre frente a la superficie, cuando el chorro supersónico de gas y partículas impacta contra el sustrato, como se puede apreciar en la Figura 31.

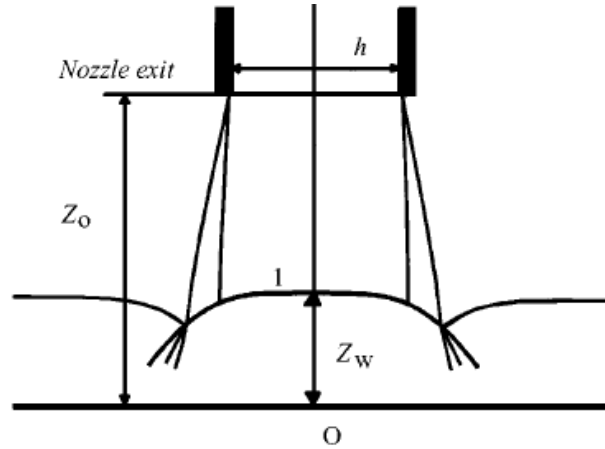


Figura 31. Esquema del impacto del chorro supersónico sobre la superficie del sustrato [51].

Realizaron cálculos y experimentos con partículas de Cu y Al. Considerando que se debe procurar la máxima velocidad de las partículas al momento de impacto con el sustrato. Dentro de los resultados se presenta un gráfico de isolíneas de las velocidades de impacto de las partículas en función de las dimensiones largo y ancho de la boquilla, ver Figura 32.

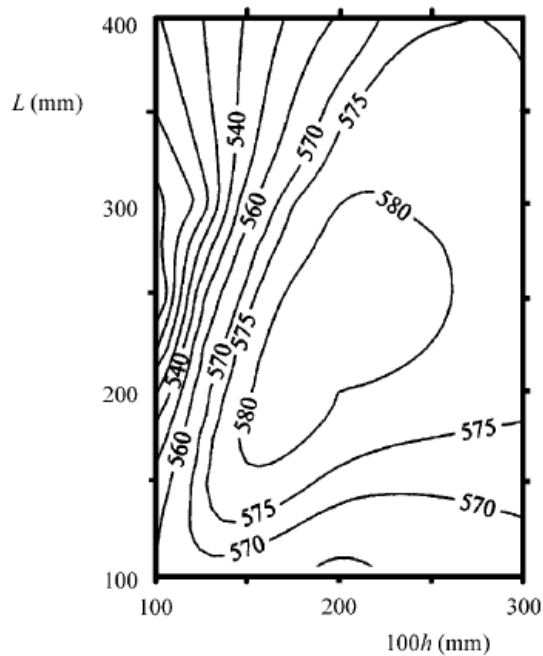


Figura 32. Isolíneas que muestran la velocidad de impacto de partículas de aluminio. Los números en las curvas denotan los valores de velocidad de impacto en relación con el largo y el ancho de una boquilla CD rectangular.

Alkhimov y colaboradores concluyen que existe una boquilla, de dimensiones definidas y para cierto tipo de partículas, con la que estas pueden alcanzar la máxima velocidad de impacto en la superficie del sustrato. Además, concluyen que este modelo que presentan puede ser utilizado para partículas ultra dispersas (0.01 a 0.5 μm), ya que mientras más pequeñas sean las partículas, mayor es la influencia de los efectos de la capa límite. Esta conclusión debe ser considerada para su aplicación en experimentos con partículas de mayor tamaño y determinar cómo se ve afectada su velocidad. El análisis de las relaciones geométricas y su influencia en la velocidad de las partículas se relaciona con el tema de estudio del presente trabajo.

En el año 2003, M. Grujic y colaboradores [52] toman como base de análisis el trabajo realizado por R.C Dykhuizen y Smith [50]. Este trabajo se enfoca en analizar el número de Mach relativo $M-Mp$ (*Mach del gas menos Mach de la partícula*) que sea óptimo para la aceleración de las partículas dentro de la tobera. Mediante una ecuación que relaciona el cambio en el área de la sección transversal con el número de Mach se puede encontrar la relación de la tobera que es óptima y permita la máxima aceleración de las partículas. Este trabajo también toma en consideración la variación del coeficiente de arrastre a lo largo de la sección divergente de la tobera, a diferencia de Dykhuizen y Smith que lo consideraron constante con un valor igual a la unidad. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que la variación del coeficiente de arrastre no hace una diferencia significativa en los valores de velocidad del gas, la velocidad de la partícula, ni en la variación óptima de la geometría de la tobera. También se concluye que el helio es mejor que el aire como gas de arrastre y en general son mejores los gases con bajo peso molecular y altos valores de la relación de calores específicos. Este trabajo contiene ecuaciones que ayudan a determinar la relación de expansión óptima de la tobera.

En el año 2006, Wen-Ya Li y colaboradores [53] presentan el rediseño óptimo de una boquilla de un sistema de CS (CGT Cold Gas Technology GmbH) a través de un método de simulación numérica utilizando el software FLUENT V6.1; con él cual, se determina el campo de flujo del gas dentro y fuera de la tobera, utilizando el modelo de turbulencia K- ϵ estándar. La aceleración de las partículas fue calculada utilizando un modelo de fase discreta (DPM). El proceso de optimización fue realizado bajo diferentes condiciones de gas, tamaño de partículas y dimensiones de la tobera, ya que estos parámetros afectan directamente la relación de expansión óptima de la tobera. La Figura 33, muestra que a medida que aumenta la longitud de la sección divergente aumenta la velocidad de las partículas (V_p), así mismo, se observa que a mayor longitud se requiere un diámetro de salida mayor, el cual será óptimo para alcanzar la mayor velocidad. Superando este diámetro de salida óptimo, la velocidad de las partículas (V_p) tiende a disminuir. La Figura 34 muestra que manteniendo fijo el diámetro de la garganta que se encontró óptimo, así como el tipo de gas, su presión y temperatura, al aumentar la longitud de la zona divergente se obtiene un incremento considerable en la velocidad de las partículas (V_p). La Figura 35 muestra que hay una relación de expansión óptima para alcanzar la máxima velocidad, se

observa que las partículas alcanzan mayor velocidad con un diámetro de garganta mayor. A medida que la relación de expansión aumenta después del valor óptimo, la velocidad de las partículas disminuye.

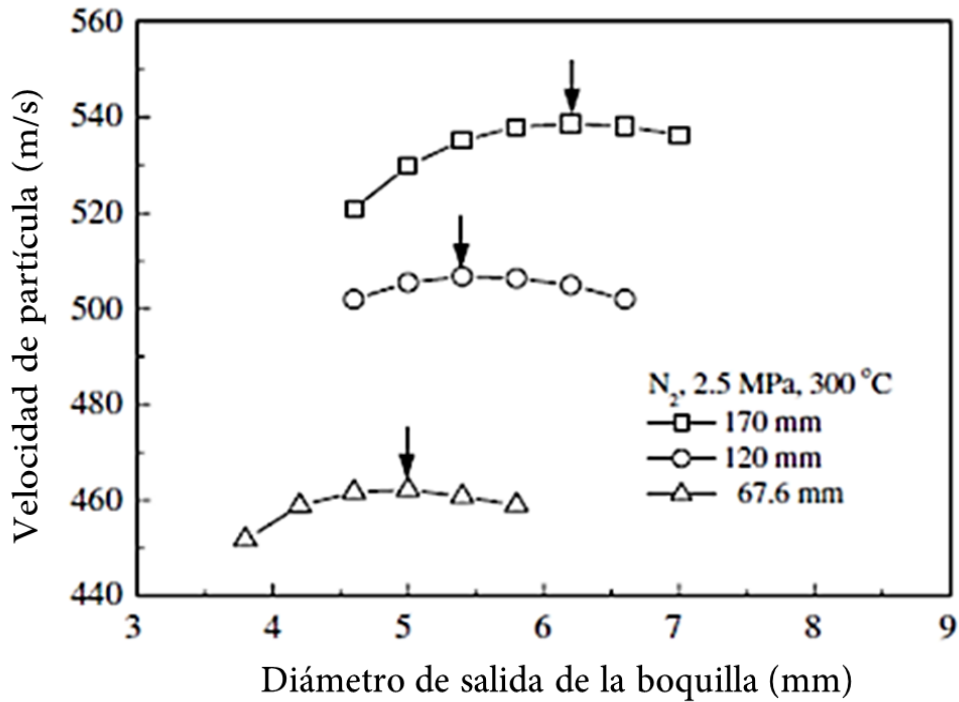


Figura 33. Efecto de la longitud de la sección divergente en el diámetro óptimo de salida [53].

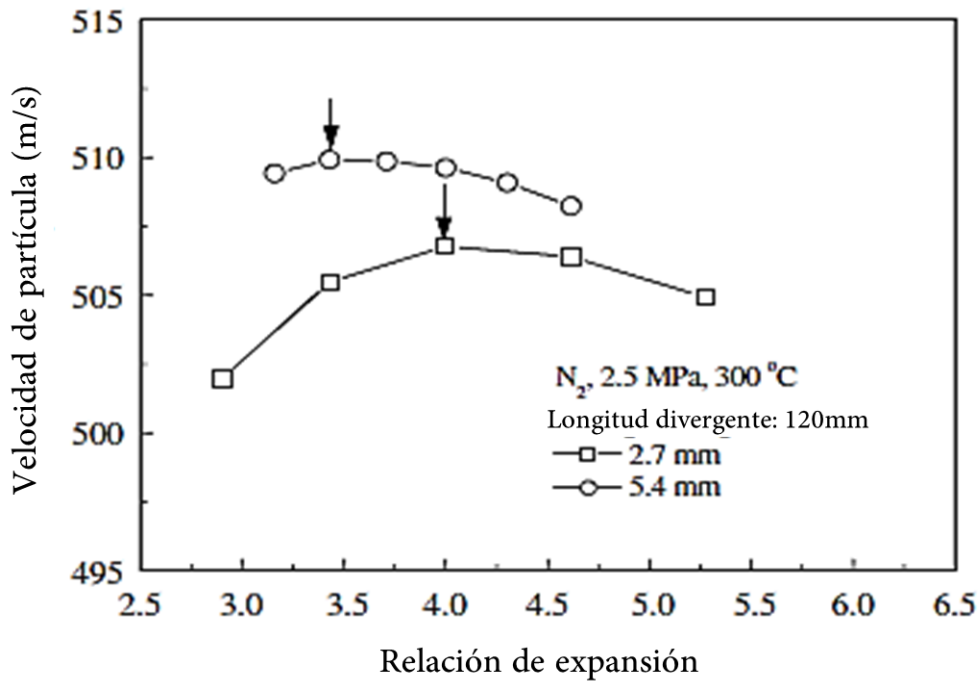


Figura 34. Efecto del diámetro de la garganta en la relación óptima de expansión de la tobera [53].

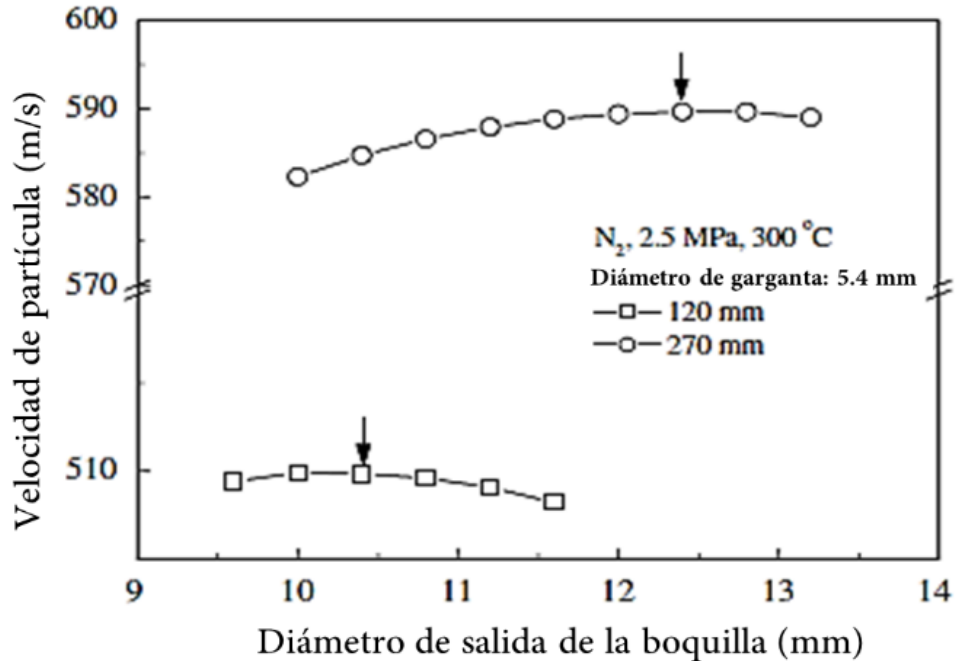


Figura 35. Efecto de la longitud de la sección divergente en el diámetro de salida óptimo para un diámetro de garganta de 5.4mm [53].

Se encontró que la relación de expansión óptima se incrementa con el aumento de la presión del gas y la longitud divergente de la tobera, y decrece con el incremento de la temperatura del gas, el tamaño de partícula y el diámetro de la garganta. También esta es menor cuando se utiliza Helio (He) que cuando se utiliza Nitrógeno (N₂), bajo las mismas condiciones de operación.

Se validaron los resultados mediante la experimentación con polvos de acero inoxidable 316L, y las dos toberas estudiadas. Encontrando que se obtienen depósitos más densos y menos porosos utilizando la tobera optimizada. Se confirma el diseño óptimo gracias a la correlación entre la velocidad de las partículas con la microestructura y microdureza del depósito. Trabajos de este tipo con simulación numérica, que manejen parámetros similares a los utilizados en este trabajo, sirven de referencia y apoyo al tema de estudio gracias a las aproximaciones obtenidas por la simulación y validación experimental.

H. Assadi y colaboradores [13] presentan en el año 2011, una herramienta práctica que permite identificar los parámetros de procesamiento óptimos para el proceso de CS de una forma sencilla e inteligible. Tomando en consideración la noción de un “*mapa de selección de parámetros*”, como se muestra en la Figura 36, propuesto inicialmente por Stoltenhoff y colaboradores en el año 2002. Con este trabajo se logra presentar de forma gráfica y sencilla las condiciones de procesamiento que permiten la adhesión de las partículas,

identificándolas en lo que llaman como ventana de deposición. Para lograr esto, se toman en consideración diferentes modelos analíticos para estudiar el proceso de CS, posteriormente se obtienen expresiones paramétricas y de ajuste que permiten utilizar los modelos para un amplio rango de valores de las variables que influyen en el proceso, las cuales repercuten en la calidad y propiedades de los depósitos obtenidos, tales como la relación de aplanamiento, la eficiencia de deposición y la resistencia del recubrimiento. Los cálculos se realizaron basándose en datos experimentales existentes para cobre y titanio y en las simulaciones para cobre y aluminio.

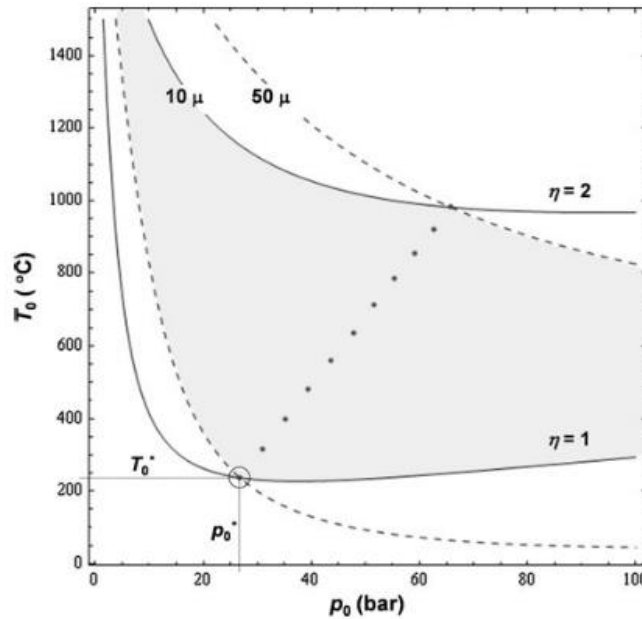


Figura 36. Mapa de selección de parámetros calculado para el cobre para dos valores diferentes de tamaño de partícula [13].

El análisis que realiza este trabajo relaciona directamente la longitud de la zona divergente con la velocidad que alcanzan las partículas. Este análisis sirve de referencia al presente trabajo para relacionar las variables geométricas de la tobera utilizada con la velocidad de las partículas y características del depósito obtenido.

Shuo Yin y colaboradores [54], presentan en el año 2011, un análisis numérico sobre dos tipos de boquillas oblicuas (rectangulares y elípticas con diferentes dimensiones), como se muestra en la Figura 37, para conocer el efecto de la forma de la sección transversal en el flujo de gas y la aceleración de las partículas, con el objetivo de encontrar una boquilla idónea que pueda aumentar la velocidad de impacto de las partículas. En este estudio, se considera la distribución de la posición y el tamaño de las partículas, gracias al uso de modelos tridimensionales, los cuales son simulados en FLUENT 6.2. De acuerdo a los resultados obtenidos, concluyen que la forma de la sección transversal de la tobera puede afectar el flujo del gas, la aceleración de las partículas y por lo tanto la velocidad de impacto de estas.

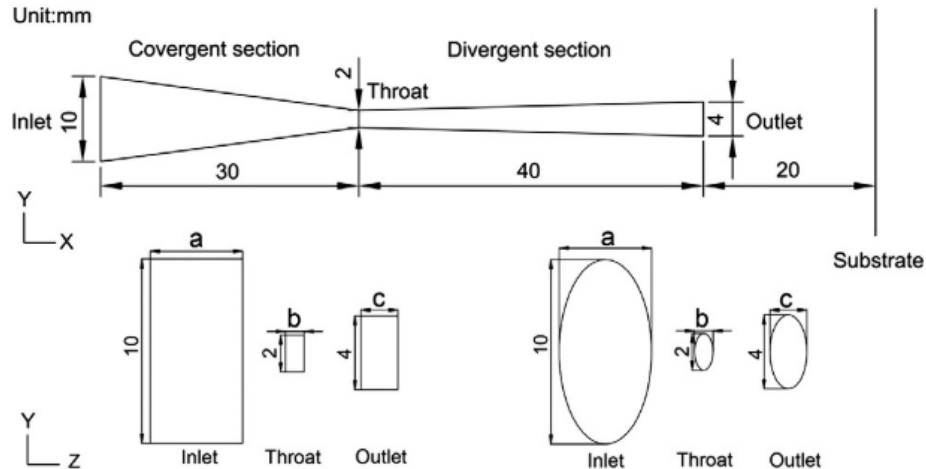


Figura 37. Esquema y dimensiones de las geometrías utilizadas en el modelo numérico [54].

Para el año 2015 M. Meyer y R. Lupoi [55] presentaron su trabajo “An analysis of the particulate flow in Cold spray nozzles”, en donde propone una conexión entre la carga de partículas y los parámetros de desempeño del CS. Se obtienen datos experimentales de depósitos de Titanio sobre tubos de aluminio, con tres diferentes boquillas (N1, N2 y N3) bajo las mismas condiciones de procesamiento. Obtienen la eficiencia de depósito con cada boquilla, y se observa que ésta decrece con el área de la sección transversal de la garganta. Los datos experimentales son comparados mediante herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics – Dinámica Computacional de Fluidos), con dos diferentes métodos, el primero es el seguimiento de partículas Lagrangiano acoplado en una dirección. Y el otro más complejo, es el método Lagrangiano acoplado de dos direcciones con colisiones estocásticas de partículas; éste se aplica a una de las boquillas, comparando así los resultados con diferentes cargas de partículas. Se observa que los métodos numéricos convencionales pueden ser limitados para la identificación de las tendencias de rendimiento del proceso, debido a que no toma en cuenta ninguna interacción gas-partícula y partícula-partícula.

Utilizando el modelo de acoplamiento bidireccional, se demostró que el efecto del aumento de la tasa de alimentación de partículas en las distribuciones de velocidad de ambas fases era notable para la boquilla N1. Sin embargo, el gran número de factores relacionados con el diseño de la tobera, los cambios extremos en la velocidad y la fracción de volumen dificultan las predicciones teóricas generales.

En el año 2020, Rocco Lupoi y colaboradores [56], en su trabajo “The role of particles flow characteristics in the performance of Cold spray nozzles”, presentan la relación entre el flujo de las partículas y su aceleración dentro de la tobera, utilizando un modelo CFD que considera por primera vez la fracción de masa de las partículas, dispersión turbulenta, fuerzas de colisión y la aleatoriedad de dispersión en la inyección de las partículas. Este estudio permite predecir la velocidad del flujo de salida de las partículas y su distribución

en el espacio. La validación experimental se lleva a cabo con un sistema de velocimetría de imagen de partículas (PIV), como se muestra en la Figura 38, que monitorea el movimiento de las partículas dentro una boquilla de un sistema de CS, ya que la boquilla utilizada es de cuarzo translucido. Los resultados muestran que cuando se incrementa la tasa de alimentación de polvo, la velocidad promedio de las partículas a la salida decrece, y aumenta el movimiento de colisión en la zona de baja velocidad. Muestra también que, la posición del inyector de partículas dentro de la boquilla es crítica, ya que determina el tiempo que permanecen las partículas en la sección de entrada de la tobera y esto en consecuencia determina la temperatura máxima que pueden alcanzar las partículas.

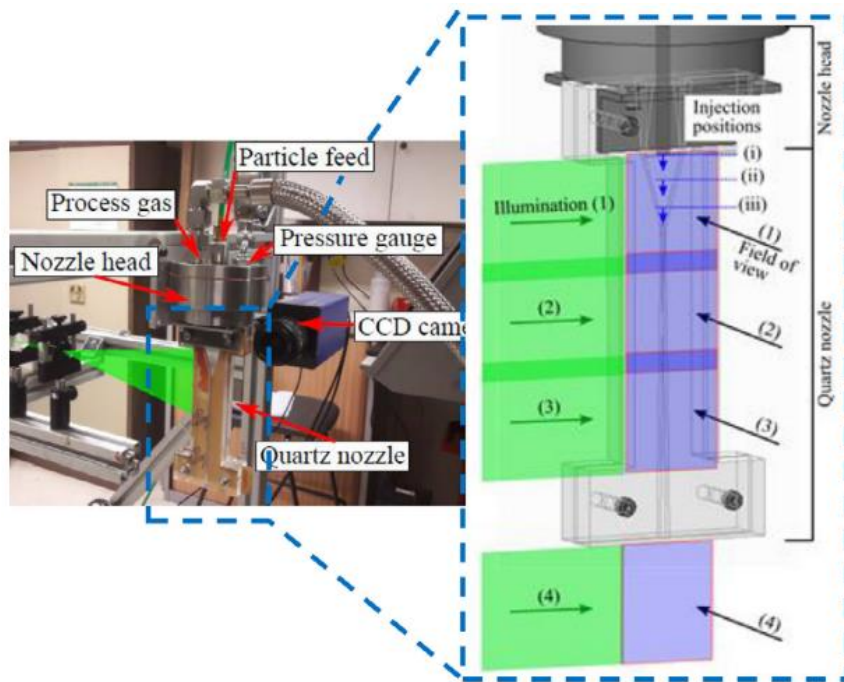


Figura 38. Sistema de velocimetría de imagen de partículas (PIV) aplicada a una boquilla de cuarzo (transparente) del sistema de CS.

Materiales, Equipos y Métodos

Se realizó una serie de experimentos para evaluar el efecto que tiene la geometría de una tobera de Laval en el proceso de CS; se realizaron recubrimientos de cobre, aprovechando la amplia documentación sobre este proceso con cobre como material de procesamiento, sobre sustratos de aluminio 6061. Este último material se eligió por su amplio uso en diferentes industrias entre ellas la aeroespacial, así como sus propiedades mecánicas, tal como la ductilidad, que al ser dúctil favorece a la adhesión de las partículas proyectadas. Los recubrimientos fueron depositados mediante el uso de un equipo de CS de baja presión de la marca DYMET, modelo D423. Se emplearon dos diferentes boquillas, de las cuales sus diferencias principales son: el tipo de sección transversal redonda y rectangular, la relación de expansión, y las longitudes de las secciones divergentes y convergentes. Lo anterior

permite conocer y relacionar directamente el efecto que tienen estas boquillas sobre el proceso y las características de los recubrimientos obtenidos.

Materiales

Sustratos

El material seleccionado para los sustratos fue Aluminio 6061, los sustratos fueron cortados en rectángulos de 2.3x2.4mm, ver Figura 39. Los cortes se realizaron mediante el uso de una fresadora. Durante el corte se utilizó un refrigerante base agua, con el objetivo de no elevar la temperatura del material y no afectar su dureza y microestructura. Posterior al corte, los sustratos se lijaron utilizando una lija #800, con el objetivo de limpiar y eliminar las imperfecciones de la superficie, concluido el lijado se enjuagaron con agua para remover los residuos de partículas de aluminio; posterior a esto recibieron un baño ultrasónico con Metanol durante 5 minutos, para eliminar la suciedad restante. A continuación, fueron secados con aire comprimido. Se pesaron en una balanza de precisión para conocer su masa antes de recubrirlos y fueron almacenados con papel secante en un desecador, con el objetivo de evitar su oxidación.



Figura 39. Sustratos lijados y limpios, elaboración propia.

Polvo de Cobre

Inicialmente se contempló utilizar dos diferentes polvos, estos de distintas marcas: Oerlikon® y Praxair®, con diferentes distribuciones de tamaño. El tamaño de las partículas fue medido con el equipo PSD Sympatec HELOS/BR-OM. Los resultados obtenidos de la medición de tamaño de partícula se muestran en la Tabla 8 y en las Figuras 40 y 41.

Tabla 8. Distribuciones de tamaño del polvo de Cu

Polvo	D10	D50	D90
Oerlikon®	50 μm	73 μm	99 μm
Praxair®	6 μm	12 μm	20 μm

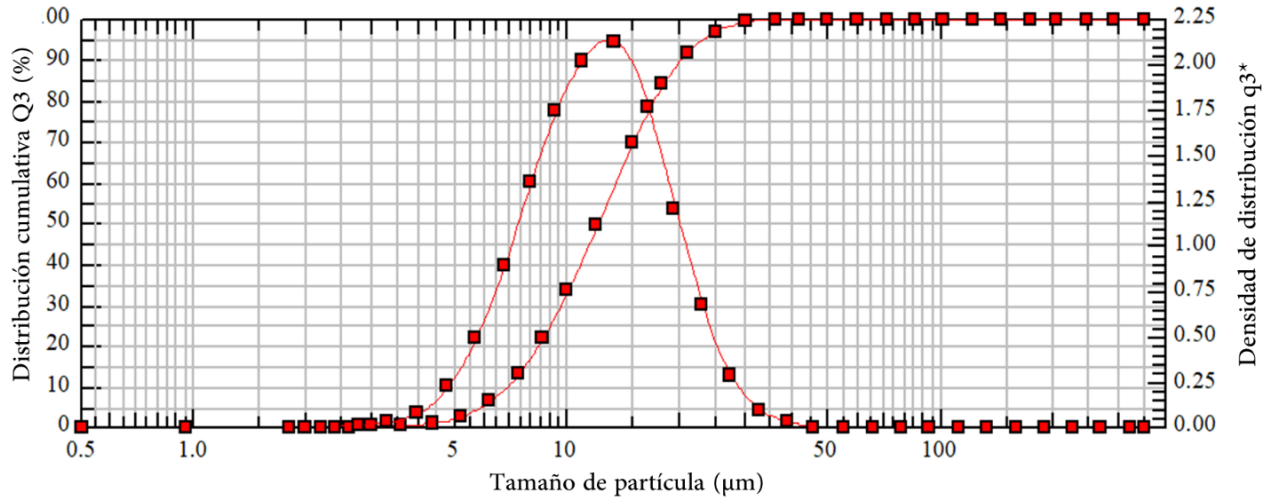


Figura 40. Distribución de Cu Praxair®.

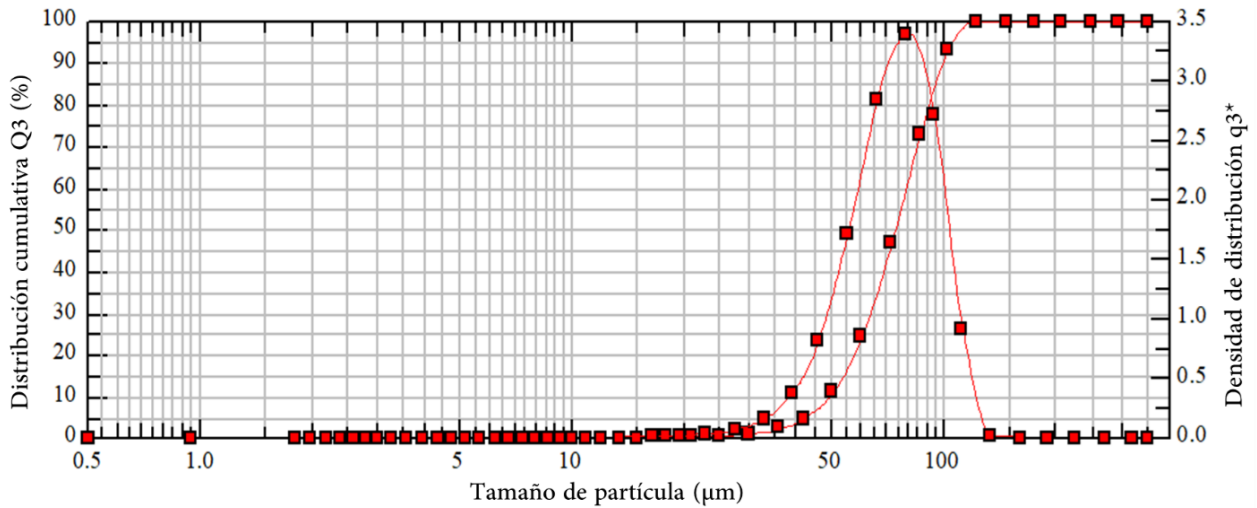


Figura 41. Distribución de tamaño de Cu Oerlikon®.

Equipos

Para realizar el proceso experimental se hizo uso de diferentes equipos y herramientas. A continuación, se enlistan junto con una breve descripción.

Dymet D423

El sistema de Cold Spray D423; se puede utilizar manualmente o de forma automatizada, para reparaciones y fabricación de nuevos componentes. Las especificaciones técnicas de este equipo se muestran en la Tabla 9. En la figura 42 se visualiza el equipo mencionado.

Tabla 9. Especificaciones técnicas Dymet 423 [57].

Máxima presión de entrada de aire comprimido	12 bar
Consumo de aire comprimido	0.3-0.4 m ³ /min
Temperatura de entrada del aire comprimido	Menor a 40 °C
Pureza del aire comprimido	Libre de agua y aceite
Presión de estancamiento Po	5 – 8 bar
Temperatura de estancamiento (a la entrada de la boquilla)	200 – 600 °C
Consumo de polvo	0.1 – 0.8 g/s
Máximo tamaño del polvo	Max 200 μm



Figura 42. Dymet D423 y panel de control.

Este equipo cuenta con dos boquillas de tipo Laval, con diferentes geometrías y dimensiones, las cuales se describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensiones de las boquillas del equipo D423.

Tipo	A _i (Área de entrada) (mm ²)	A* (Área de garganta) (mm ²)	A _e (Área de salida) (mm ²)	re (relación de expansión)	L* (Longitud de garganta) (mm)	L _c (Longitud convergente) (mm)	L _d (Longitud divergente) (mm)
CD redonda	63.62 D=9mm	4.91 D=2.5mm	18.10 D=4.8mm	3.69	7.5	11	120
CD plana	63.62	4.91	31.5	6.41	9.3	15	140

A continuación, en la Figura 43 se muestran los planos de las boquillas, las medidas fueron adquiridas mediante la medición manual de las boquillas, procurando en todo momento la reproducibilidad de las mediciones. En las Figuras 44 y 45 se muestran la boquilla rectangular y redonda, respectivamente.

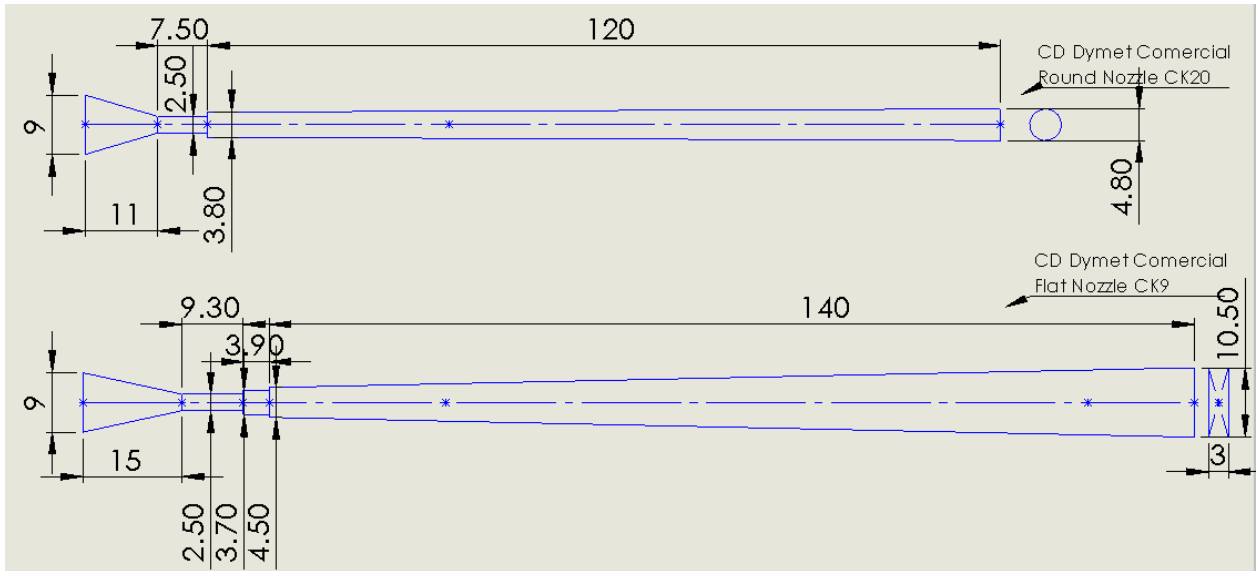


Figura 43. Planos de las boquillas utilizadas, elaboración propia.



Figura 44. Boquilla rectangular, elaboración propia.



Figura 45. Boquilla redonda, elaboración propia.

Robot KUKA KR 60-3

Fue empleado un brazo robótico de 6 ejes de marca KUKA, con capacidad de carga de 60kg. En este robot fue montada la pistola del Dymet 423, ver Figura 46.



Figura 46. Robot KUKA en cabina de alta velocidad, propiedad del laboratorio CENAPROT, fotografía de elaboración propia.

PSD Sympatec HELOS/BR-OM

El equipo HELOS/BR-OM es un sensor de difracción láser para análisis de tamaño de partícula en un rango de entre 0.1 a 875 micrómetros[58]. Se puede usar para sólidos y suspensiones, muestras pequeñas del rango de unos cuantos miligramos pueden medirse de forma confiable. En la Figura 47 se muestra el equipo anterior.



Figura 47. PSD Sympatec Helos/BR-OM, Fuente: Sympatec brochure HELOS [58].

HiWatch

Este aparato se compone por un láser estroboscópico de diodo de alta potencia junto con una cámara, la cual permite la detección de partículas proyectadas a cualquier temperatura. Este equipo tiene una configuración especial para el proceso de CS, donde esta pre alineada una cámara CCD y el láser HiWatch; este está diseñado para el análisis de velocidad de las partículas del proceso de CS de alta velocidad. La pre alineación permite su fácil uso e instalación, ver Figura 48 [59].

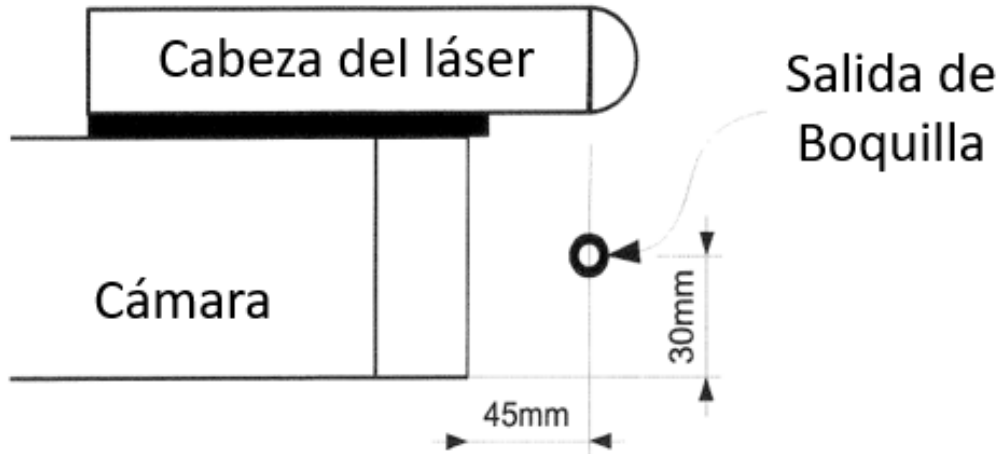


Figura 49. Posicionamiento del HiWatch con boquilla. Fuente: Manual de operación HiWatch [59].

Otros equipos

Además de los equipos descritos anteriormente, también fue necesario el uso de equipos de corte y pulido para preparar los sustratos, una tamizadora RX-29, con tamices de diferentes tamaños de malla (25, 38, 58 y 75 μm), un calentador y una prensa para posicionar y calentar los sustratos antes y durante el proceso de recubrimiento.

Software KSS®

Con el objetivo de obtener una primera aproximación y analizar el comportamiento de las variables experimentales y la eficiencia de depósito se empleó el Software KSS®. La función de éste es proporcionar una primera aproximación del proceso de CS y obtener información importante sobre las variables de procesamiento tal como: velocidad y temperatura de las partículas y el gas de procesamiento, así como la eficiencia de depósito esperada; además, muestra una predicción de la ventana de depósito y otros gráficos de gran utilidad, donde se pueden relacionar diferentes parámetros de procesamiento y resultados.

Este software cuenta con una interfaz intuitiva y fácil de usar, dentro de ella se puede acceder a diferentes módulos del programa, de los más importantes y los que fueron utilizados se encuentran: el Mapa de selección de parámetros, Simulación y Base de datos; así como un apartado donde se muestra la literatura que sustenta el funcionamiento y modelo de este software. A continuación, se hace una breve descripción del uso del software KSS y sus diferentes módulos.

Mapa de Selección de Parámetros

Aquí se permite seleccionar diferentes parámetros como: material y diámetro de partícula, boquilla, el tipo de gas y sus condiciones, con esto el software realiza los cálculos para entregar al usuario diferentes tipos de gráficos (Figuras 49 y 50), estos son:

- Gráficas 2D que muestran los valores de impacto (v_p , T_p , v_{krit}) en función de los parámetros de procesamiento T_o , p_o , D_p .
- Gráficas 2D que muestran valores clave que describen el recubrimiento (DE , η , ρ) en función de los parámetros de procesamiento T_o , p_o , D_p .
- Gráficos de contorno que muestran los valores clave del recubrimiento en función de dos parámetros de procesamiento y/o diámetro de las partículas procesadas.

Esta sección es de gran utilidad para poder conocer y comparar diferentes valores de procesamiento y además disponer de información de fácil visualización que ayuda a seleccionar los parámetros más adecuados. Cabe resaltar que este apartado solo permite elegir entre Nitrógeno o Helio como gases de procesamiento, lo cual limita el uso de este módulo.

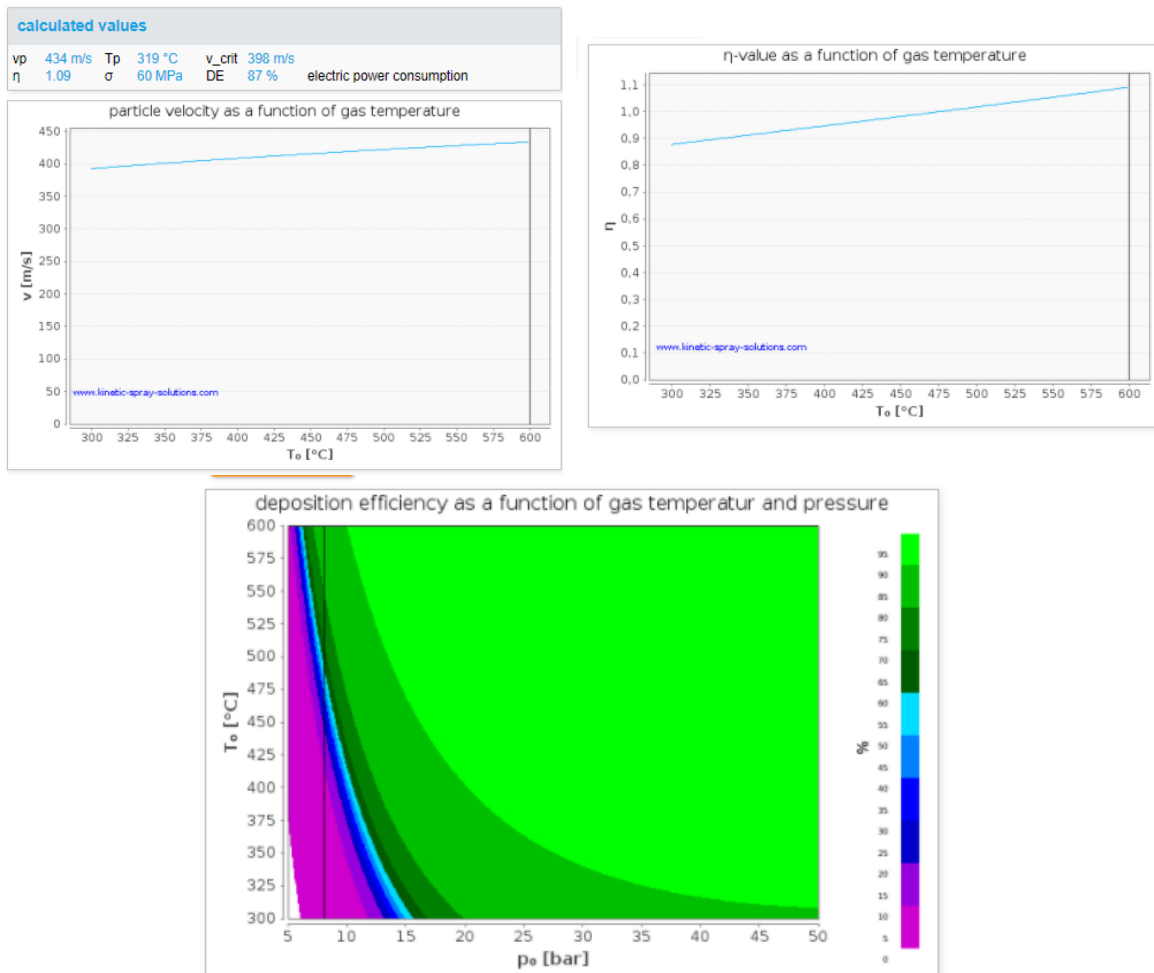


Figura 49. Gráficos obtenidos en el módulo de Mapa de selección de parámetros.

PSM

Material: Cu OFHC sof

nozzle: DYMET O

gas: Nitrogen

consider particle size effect:

fix range

gas temperature: 600 300 - 600 °C

gas pressure: 8 5 - 50 bar

particle diameter: 20 6 - 73 μm

plot selection

2D plots Impact Parameters

$vp(T_0)$ $vp(p_0)$ $vp(D_p)$

$Tp(T_0)$ $Tp(p_0)$ $Tp(D_p)$

$v_krit(T_0)$ $v_krit(p_0)$ $v_krit(D_p)$

2D plots coating key figures

$\eta(T_0)$ $\eta(p_0)$ $\eta(D_p)$

$\sigma(T_0)$ $\sigma(p_0)$ $\sigma(D_p)$

$DE(T_0)$ $DE(p_0)$ $DE(D_p)$

contour plots coating key figures

$\eta(T_0, p_0)$ $\eta(p_0, D_p)$ $\eta(T_0, D_p)$

$\sigma(T_0, p_0)$ $\sigma(p_0, D_p)$ $\sigma(T_0, D_p)$

$DE(T_0, p_0)$ $DE(p_0, D_p)$ $DE(T_0, D_p)$

update charts

Figura 50. Apartados que permiten la selección de los parámetros a calcular, así como los diferentes gráficos disponibles.

Simulación

En esta sección el software permite simular el proceso de CS variando distintos parámetros de procesamiento, tales como la selección de diferentes equipos (los cuales pueden ser elegidos de la base de datos del software, o bien, nuevos equipos agregados por el usuario), el material, tamaño de partícula, tasa de alimentación del polvo y las condiciones del gas de procesamiento. Esta parte de la interfaz se muestra a continuación en la Figura 51.

equipment configuration hide

equipment: D423

nozzle: DYMET O

x start position powder injection: 0 m

stand-off distance: 0.0125 m

process gas parameter hide

gas temperature: 600 °C

gas pressure: 8 bar

process gas 1: Air

volume flow rate gas: 1,084.9 Nm³/h

powder feeder hide

powder feeder: FD 1,5-492

rotation feeder disk: 5.0 rpm

powder: Cu OFHC soft Cu Praxair

D10: 6.0 μm D50: 12 μm D90: 20 μm

feedrate: 61.08g/min 3.66kg/h

add

carrier gas conditions hide

carrier gas: Helium

fraction in overall gas mix: 0.05 [0..1]

carrier gas and particle temperature: 20 °C

injection speed particle: 15.0 m/s

calculation parameters hide

isoenergetic calculation:

consider particle size effect:

Figura 51. Menu de selección de parámetros del módulo “Simulación”.

Una vez seleccionados los parametros se puede iniciar el calculo, los resultados obtenidos se pueden visualizar mediante utiles gráficos, como la ventana de deposito, así como las gráficas de la temperatura y velocidad del gas y las partículas, Figuras 52 y 53.

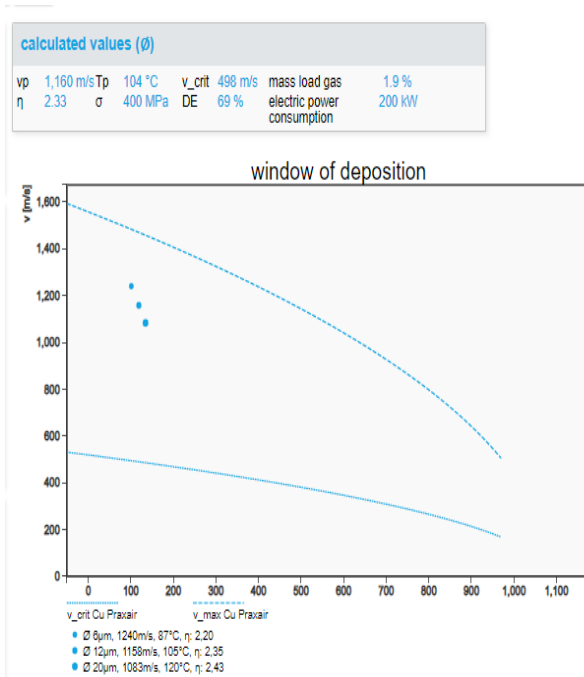


Figura 52. Ventana de deposito

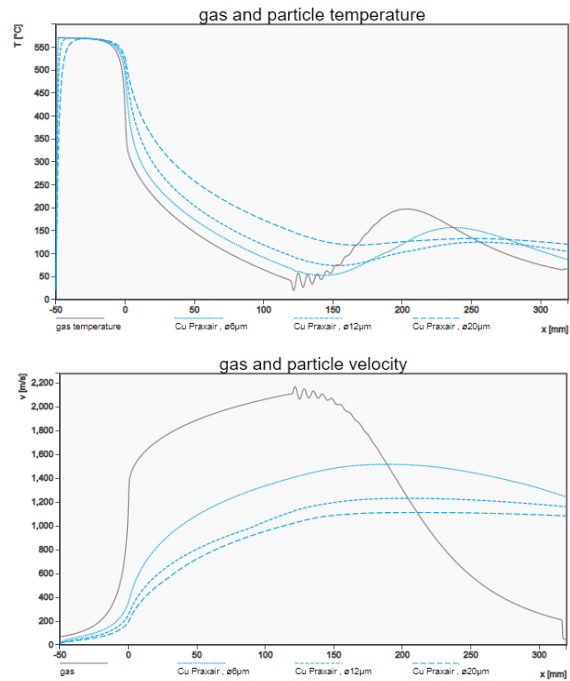


Figura 53. Velocidad y temperatura del gas y partículas.

Base de datos

Esta sección del software cuenta con una amplia base de datos de Equipos de CS, Boquillas, Gas, Materiales y Polvos; así mismo el usuario puede ingresar nueva información de cualquiera de estos productos. A continuación, se muestra la interfaz de los apartados mencionados anteriormente.

Equipos

La interfaz muestra equipos previamente cargados en el software y la opción para agregar nuevos equipos. Al agregar nuevos equipos es necesario proporcionar la información solicitada, tal como presión, temperatura y flujo máximo. De esta manera se agregó el equipo de CS Dymet D423. Este modelo solo permite simular la alimentación de las partículas de forma axial, esto difiere del equipo D423, ya que en este la entrada de las partículas es de forma perpendicular en la sección de la garganta. Otro punto importante de resaltar es la existencia de una sección llamada “Pre cámara”, la cual no cuentan con ella en el caso de algunos sistemas de baja presión.

logged in as cenaprot
Language DE EN
preferences
Home Parameter Selection Map Simulation **Database** Literature

Facility Nozzles Gas Material Powder

new

type

max. pressure bar

max. temperature °C

max. electrical power kW

max. flow Nm³/h

max. powder feeding rate g/min

max. x-position powder injection m

x start position prechamber m

price

supplier please select

save
cancel

supplier	type	max. pressure [bar]	max. temperature [°C]	max. electrical power [kW]	max. flow [Nm³/h]	max. powder feeding rate [g/min]	max. x-position powder injection [m]	x start position prechamber [m]
CGT GmbH	K2000	20	400	10.0	100.0	100.0	-0.05	-0.050
CGT GmbH	K3000	30	550	30.0	150.0	150.0	-0.02	-0.050
CGT GmbH	K4000-17	40	800	17.0	150.0	150.0	-0.02	-0.200
CGT GmbH	K4000-34	40	800	34.0	150.0	200.0	-0.02	-0.200
CGT GmbH	K4000-47	40	800	47.0	150.0	200.0	-0.02	-0.200
CGT GmbH	K8000-50	40	1000	50.0	220.0	500.0	-0.02	-0.200
CGT GmbH	K8000-80	40	1000	80.0	320.0	500.0	-0.02	-0.200
Plasma Giken	PCS-1000	50	1000	80.0	250.0	500.0	-0.1	-0.150

Figura 54. Base de datos de Equipos de CS

Boquillas

En esta sección se encuentra información de diferentes boquillas compatibles con los equipos de la base de datos, ver Figura 55. Además, tiene la opción de que el usuario pueda agregar nuevas boquillas. El software esta preconfigurado solamente para agregar boquillas de tipo Laval de sección transversal circular, sin embargo, de acuerdo a información proporcionada por el proveedor del software también se pueden agregar boquillas del tipo Convergente-Barril (CB), esta geometría se puede emular seleccionando una relación de expansión igual a la unidad.

logged in
Language
preferen

[Home](#)
[Parameter Selection Map](#)
[Simulation](#)
[Database](#)
[Literature](#)

Facility
Nozzles
Gas
Material
Powder

new

type

radius prechamber m

radius nozzle throat (x=0) m

x end position nozzle m

expansion ratio

efficiency

min. spraying distance

max. spraying distance

supplier

price

compatible with equipment

- K2000
- K3000
- K4000-17
- K4000-34
- K4000-47
- K8000-50
- K8000-80
- PCS-1000
- PCS-800
- Centerline
- Dymet 403K
- K8000-92 HSU
- Impact Spray System 5/8
- Impact Spray System 5/11
- Impact Spray System 6/10
- D423

Nozzle: Geometric Definition of the Nozzle and Restriction of Spray Distance

supplier	type	radius prechamber [m]	radius nozzle throat (x=0) [m]	x end position nozzle [m]	expansion ratio	efficiency	min. spraying distance	max. spraying distance	compatible with equipment
CGT GmbH	D2st	0.007	0.00135	0.075	8.8	0.91	0.02	0.20	K2000 K3000 K4000-17 K4000-34 K4000-47 K8000-50 K8000-80 K8000-92 HSU

Figura 55. Base de datos boquillas.

Gas, Material y Polvo

Al igual que las secciones para los equipos y boquillas, ocurre con el gas, material y polvo. El software cuenta con información previamente cargada, con la opción de agregar nuevos productos, como se muestra en la Figura 56.

Facility															Nozzles															Gas															Material															Powder														
new															gas type															chemical symbol															mole mass [g/mol]																													
Helium															He															4.002																																												
Nitrogen															N ₂															28.002																																												
Air																														28.964																																												
Argon															Ar															39.948																																												
Carbon Dioxide															CO ₂															44.01																																												
Hydrogen															H ₂															2.016																																												
Steam															H ₂ O															18.02																																												

Facility															Nozzles															Gas															Material															Powder																																																																																																																																																																				
new															source															base element															designation															density [kg/m ³]															melting point [°C]															specific heat [J/kgK]															tensile strength [MPa]															tensile strength cold worked [MPa]															AA1 [%]															AA2 [%]															AA3 [%]															TA1 [°C]															TA2 [°C]															k1														
FG															Ag															Ag99.9 CP soft															10490															962															234															180															325															20.0															30.0															50.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.0 1100 H14 half hard															2710															943															904															125															165															10.0															20.0															30.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.0 1100 H18 hard															2710															943															904															165															165															10.0															20.0															30.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.0 1100 O soft															2710															943															904															90															165															20.0															40.0															80.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.5 1050 H14 half hard															2705															857															900															110															160															5.0															10.0															20.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.5 1050 H18 hard															2705															857															900															160															160															5.0															7.0															10.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.5 1050 O soft															2705															857															900															80															160															20.0															40.0															80.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.8 1180 H18 hard															2705															858															900															125															125															3.0															5.0															10.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															Al99.8 1180 O soft															2705															858															900															80															125															20.0															40.0															80.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															AlCu1.6Zn5.8 7075 O soft															2810															477															980															228															670															10.0															10.0															30.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															AlCu1.6Zn5.8 7075 T6 aged															2810															477															980															572															525															9.0															11.0															70.0															-196															20															0.1																													
FG															Al															AlCu4.3Mg1.5 2024 O soft															2780															500															875															190															420															20.0															20.0															40.0															-196															20															0.1																													
FG															Al															AlCu4.3Mg1.5 2024 T3 hard															2780															500															875															440															443															18.0															17.0															100.0															-196															20															0.1																													
FG															Al															AlCu4.3Mg1.5 2024 T6 annealed															2780															500															875															430															458															10.0															10.0															100.0															-196															20															0.1																													
FG															Al															AlMg1.4Mn0.5 7005 O soft															2780															804															875															195															350															15.0															20.0															35.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															AlMg1.4Mn0.5 7005 T6 aged															2780															804															875															350															365															10.0															13.0															20.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															AlMg1.50.6 6061 O soft															2700															582															896															124															310															15.0															22.0															30.0															-273															20															0.1																													
FG															Al															AlMg1.50.6 6061 T4 aged															2700															582															896															241															310															15.0															22.0															30.0															-273															20															0.1																													

Facility															Nozzles															Gas															Material															Powder																																																																																																								
new															base element															material															designation															description															supplier															D10 [µm]															D50 [µm]															D90 [µm]															powder packing density [0..1]															Correction factor od-value														
Al															Al99.8 1180 O soft															Al 99.93 Eoka RSA5 -45 µm (Test)															Eoka RSA5 (Eckert Fürth)																														15															25															38															0.50															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															HDS -35+15 µm															Agglomerate und Satelliten																														15															22															34															0.58															1.2																													
Cu															Cu OFHC soft															BSA -38+16 µm																																													16															25															36															0.83															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															BSA -75+25 µm															Agglomerate und Satelliten																														25															55															75															0.60															1.2																													
Cu															Cu OFHC soft															TLS -38+16 µm																																													16															28															40															0.85															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															TLS -85+38 µm																																													38															50															65															0.65															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															METCO 1007																																													31															60															88															0.85															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															Eoka Ch-L12																																													10															20															45															0.38															2.0																													
Cu															Cu OFHC soft															Cu-fern (Test)																																													3.0															8.0															12															0.45															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															Cu-mittel (Test)																																													15															30															45															0.55															1.0																													
Cu															Cu OFHC soft															Cu-grob (Test)																																													50															150															250															0.85															1.0																													
Fe															Fe99.9 Steel A283 grade A															Fe (Test)																																													15															30															45															0.50															1.0																													
Fe															steel 316L, austenitic															316L Carpenter -44 + 38 µm (Test)															Carpenter Heat 43184																														40															42															43															0.80															1.0																													
Fe															steel 316L, austenitic															316L Carpenter -38 + 16 µm (Test)															Carpenter Heat 43184																														15															28															35															0.45															1.0																													
Fe															steel 316L, austenitic															316L Carpenter -38 + 44 µm (Test)															Carpenter Heat 4-3083																														48															66															80															0.65															1.0																													
Fe															steel 316L, austenitic															316L Carpenter -75 + 45 µm (Test)															Carpenter Heat 4-3083																														48															50															70															0.60															1.0																													
Fe															steel 316L, austenitic															316L Carpenter -177 + 53 µm (Test)															Carpenter Heat 8-0203																														60															115															160															0.85															1.0																													
Ni															Ni99.97															Ni99.7% TLS -45+25 µm (Test)															TLS LOT0489/111																														15															35															40															0.50															1.0																													

Figura 56. Base de datos del Gas, Material y Polvo.

Métodos.

Como se mencionó anteriormente, la planeación inicial experimental incluía el uso de dos tipos diferentes de polvos, sin embargo, de acuerdo a las especificaciones del polvo marca Oerlikon®, la distribución del tamaño de partícula está recomendada para procesos de alta velocidad como HVOF y HPCS. Por lo anterior, el material no es apto para ser depositado utilizando el sistema Dymet 423 de baja presión, esto se corroboró mediante el software KSS® utilizando los parámetros máximos del equipo; este predijo una muy baja tasa de depósito con la distribución de tamaño original del polvo Oerlikon®, ver Figura 57.

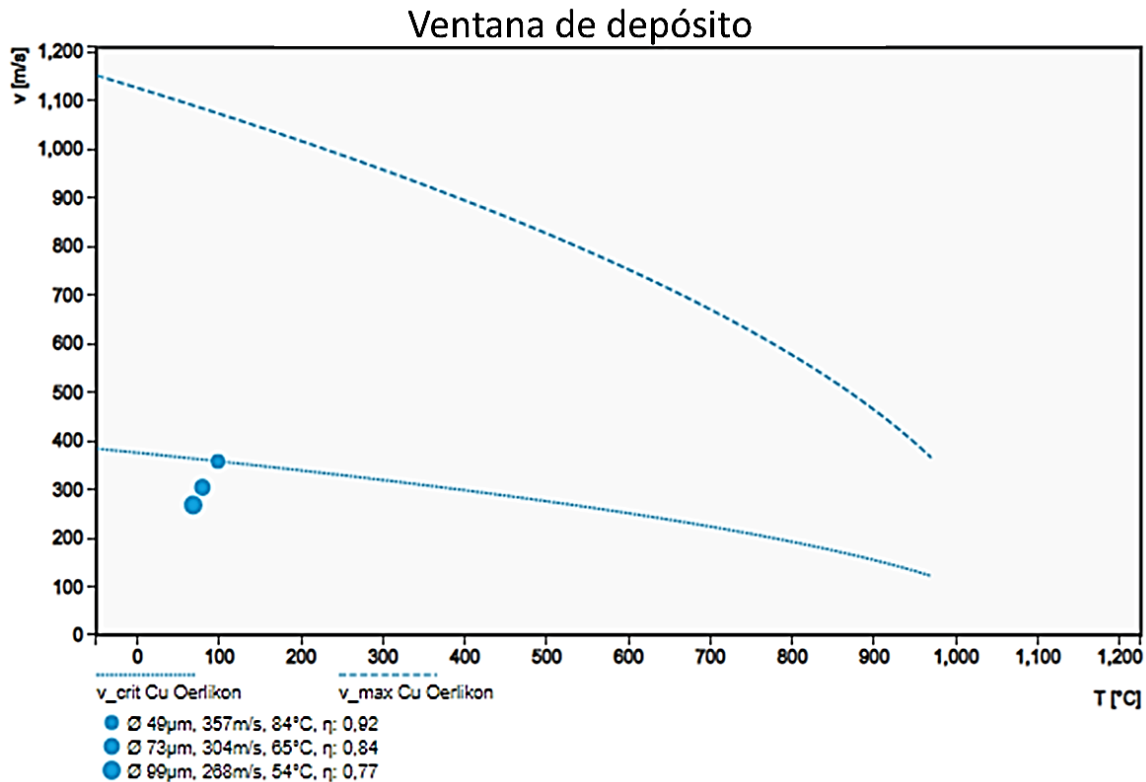


Figura 57. Ventana de depósito del polvo grueso Oerlikon®, obtenida con KSS®, elaboración propia.

En la ventana de depósito obtenida mediante KSS para el polvo Oerlikon® mostrada en la Figura 57, se observa que las partículas de menor tamaño (-49µm) están cerca de alcanzar la velocidad crítica necesaria para depositarse; por ello se tomó la decisión de tamizar este polvo para lograr separar las partículas más pequeñas. En este ejercicio se esperaba separar las partículas en el rango de tamaño de 25-38µm, sin embargo, se recolectó muy poco polvo con ese rango de tamaño. Con el poco polvo tamizado se realizaron pruebas de depósito para conocer su comportamiento y eficiencia de depósito. Obteniendo nulo éxito en la formación de depósito, según lo observado a simple vista, este polvo solo degradó la superficie haciendo un efecto de granallado que se puede observar en la Figura 58.



Figura 58. Resultado de la prueba de recubrimiento realizada con el polvo Oerlikon® tamizado, elaboración propia.

De acuerdo a las simulaciones y pruebas realizadas, se concluyó que el polvo de la marca Oerlikon® no podría ser procesado con el equipo D423, por lo que se determinó utilizar únicamente el polvo de la marca Praxair® por su distribución de tamaño más pequeña.

La determinación de parámetros experimentales se realizó basándose en la revisión de la literatura y en la experiencia previa del equipo de trabajo del CENAPROT. Se consideraron factores que influyen en el proceso de CS y en las propiedades de sus depósitos; es conocido que estos dependen principalmente de las condiciones de impacto de las partículas, es decir, la velocidad y temperatura de las partículas, y también de la temperatura del sustrato [36].

En base a la información contenida en las tablas sobre los diferentes efectos de las variables del proceso de CS, podemos conocer los principales parámetros de procesamiento que influyen en las condiciones de impacto y por ende en las propiedades de los depósitos obtenidos.

Fue así que se planteó un set de experimentos donde solamente se evaluara la respuesta de las boquillas haciendo uso de un solo polvo, con las variables del equipo y procesamiento fijas, variando únicamente el tipo de boquilla y la distancia de rociado. Las condiciones de operación se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones de operación para el proceso experimental.

Condiciones de Operación												
Partículas				Gas					Boquilla	Otros parámetros de procesamiento		
Material	Tamaño (µm)			Tasa de alimentación	Tipo	To (°C)	Po (Bar)	Flujo Másico	Geometría	Distancia de rociado	Ángulo	Velocidad del robot
Cu +99% Praxair	D10	D50	D90	0.25 g/s	Aire	600	8	400 L/s	Round	12.5 mm 22.5 mm	0°	10 mm/s
	6	12	20						Flat			

Las variables de respuesta consideradas incluyen la medición de la velocidad de las partículas a la salida de la tobera y justo antes del impacto con el sustrato, mediante el uso del equipo HiWatch. Así mismo otras variables de respuesta que se consideran son la porosidad, micro dureza, adhesión y micrografía de los depósitos obtenidos, los cuales pueden ser relacionados con la velocidad de impacto de las partículas, así como la eficiencia de deposición [13, 40].

Los factores estudiados y las respuestas evaluadas se enlistan en la Tabla 12:

Tabla 12. Factores de estudio y respuestas de evaluación del sistema de LPCS.

Factores Estudiados	Respuestas evaluadas
Boquilla CD redonda Boquilla CD plana Distancia de rociado (12.5 y 22.5mm)	Velocidad de las Partículas Porosidad Micro dureza Adhesión Micrografía Eficiencia de deposito

En la Tabla 13 se muestra el diseño de experimentos. Este set de experimentos se propuso en base a las boquillas disponibles y configuraciones posibles con el equipo del laboratorio CENAPROT, por lo que no se consideró un diseño factorial, tal como 2^3 . Las corridas del diseño experimental contemplan una réplica de cada condición propuesta.

Tabla 13. Diseño experimental.

Corrida	Sustrato	Boquilla	Orientación	Pasadas de la pistola	Distancia de rociado (mm)
N1	11	Rectangular	Vertical	1 pasada	12.5
N2	12	Rectangular	Vertical	1 pasada	22.5
N3	13	Rectangular	Vertical	1 pasada	22.5
N4	14	Rectangular	Vertical	1 pasada	12.5
N9	21	Redonda	N/A	3 pasadas	12.5
N10	22	Redonda	N/A	3 pasadas	22.5
N11	23	Redonda	N/A	3 pasadas	22.5
N12	24	Redonda	N/A	3 pasadas	12.5

Procedimiento de para fabricar los recubrimientos

Una vez determinados los parámetros a utilizar en las diferentes corridas del diseño experimental. Se dispuso a realizar los experimentos planeados. Fue utilizada una configuración probada por estudiantes del CENAPROT (Figura 59), esta se describe de la siguiente manera: se sostienen los sustratos con una pequeña prensa tipo tornillo de metal, la cual se coloca sobre un calentador eléctrico. Por conducción se transfiere el calor desde el calentador hacia la prensa y de la misma manera hacia los sustratos; con este método fue posible elevar la temperatura de los sustratos, en promedio a 205 °C.



Figura 59. Configuración para posicionar y calentar los sustratos, elaboración propia.

Además de posicionar y calentar los sustratos también se programó el robot KUKA, para realizar la ruta que seguiría para fabricar el recubrimiento, esta fue construida con 3 líneas con una separación de 2mm entre cada línea. Así mismo se realizaron los ajustes necesarios para lograr la distancia de rociado deseada entre la salida de la boquilla hasta la superficie del sustrato. Este ajuste se puede observar en la Figura 60.

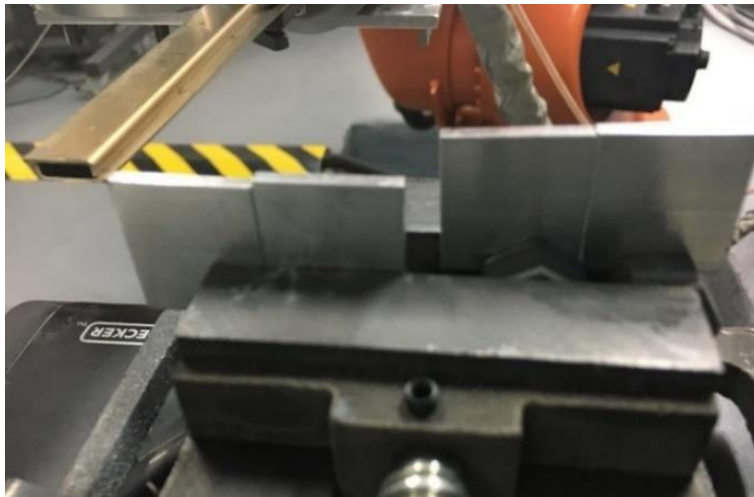


Figura 60. Configuración de la distancia entre la salida de la boquilla y la superficie de los sustratos.

Una vez ajustada la distancia de rociado y alcanzada la temperatura deseada de los sustratos se procede a iniciar el equipo DYMET D423, seleccionando configuración de operación del equipo, previamente establecida para este set experimental. La configuración se muestra en la Figura 61.



Figura 61. Configuración de operación del equipo D423, elaboración propia.

Por recomendación del equipo de usuarios del CENAPROT, se espera durante 1 minuto para que el gas alcance la temperatura de operación seleccionada. Pasado el minuto se enciende el alimentador de polvo. Una vez comprobada la salida del polvo por la boquilla se inicia la ruta programada en el robot KUKA. El recubrimiento se comienza a formar a mediada que el robot avanza en la ruta programada. Esto se puede observar en la Figura 62.



Figura 62. Secuencia de ruta programada del robot KUKA para la formación del recubrimiento, elaboración propia.

Una vez concluida la ruta programada, los sustratos se retiran de forma inmediata para evitar que se sigan calentando y que esto cause la oxidación del recubrimiento. Posteriormente se trasladan a un desecador (Figura 63), se espera que se enfríen para después medir el cambio de la masa posterior al recubrimiento. Una vez pesados los recubrimientos, se envuelven en papel secante y se almacenan en el desecador hasta su caracterización.



Figura 63. Recubrimientos en desecador, elaboración propia.

Caracterización y Diagnóstico

Para la caracterización de los recubrimientos obtenidos, sus propiedades y características se realizaron ensayos de porosidad, microdureza, micrografía, adhesión y cálculo de la eficiencia de depósito. Además, como parte del diagnóstico del proceso se midió la velocidad de las partículas a la salida de la boquilla y en la zona cercana a la superficie del sustrato, donde impactan las partículas proyectadas.

Cálculo de la eficiencia de depósito

La eficiencia de depósito fue calculada mediante una relación sencilla, que relaciona la masa de polvo que sale por el alimentador del equipo D423, el tiempo que pasa la boquilla sobre el sustrato (tasa de inyección) y la masa final del sustrato junto con el recubrimiento después del procedimiento.

Para esto, primero se caracterizó la tasa de alimentación del equipo con el polvo a utilizar. Esto es necesario ya que este equipo emplea un alimentador mecánico, en el cual influye el tamaño de partícula del polvo, la naturaleza del polvo, así como la cantidad de polvo que se encuentra en el alimentador, debido a que este hace uso de vibración y la fuerza de gravedad para alimentar el polvo. Una vez conocida la masa de polvo que es entregada por el alimentador en los diferentes niveles de operación, se selecciona un nivel de acuerdo a la configuración operacional seleccionada.

Conociendo la cantidad de polvo que en teoría sale por la boquilla y el tiempo que el sustrato está expuesto al chorro de la boquilla, se puede estimar el polvo que se espera salga por la boquilla y sea depositado. También, después de medir la masa de los sustratos ya recubiertos, se calcula la diferencia de peso para conocer la masa de polvo adherida durante el recubrimiento. Con esta información se hace el cálculo correspondiente para estimar el porcentaje de material que se quedó adherido en el sustrato durante el procedimiento, de acuerdo a la Ecuación (30).

$$DE = \frac{\text{Masa adherida}}{\text{Masa entregada por el alimentador}} \quad (30)$$

Medición de la velocidad de las partículas (HiWatch)

Una vez conocido el uso y funcionamiento del equipo HiWatch se realizaron las mediciones de velocidad de las partículas en con diferentes condiciones. Las cuales se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de medición del equipo HiWatch.

Boquilla	Orientación	Posición	Polvo
Redonda	N/A	A la salida de la boquilla	Praxair
		Cerca del sustrato	
Rectangular	Vertical	A la salida de la boquilla	
	Vertical	Cerca del sustrato	

Este equipo de diagnóstico cuenta con una pre alineación de la cámara y el láser. La cámara y el láser se encuentran pre ensamblados, con el objetivo de facilitar la medición de la velocidad de las partículas, con esta configuración se puede medir un área limitada de la sección del chorro hacia el cual se enfoca el láser y la cámara, según lo indica el manual de usuario. El HiWatch es un complemento del equipo SprayWatch, el cual se emplea para medir procesos de proyección térmica de mayor temperatura, por ello se utiliza la computadora de este equipo, ver Figura 64.

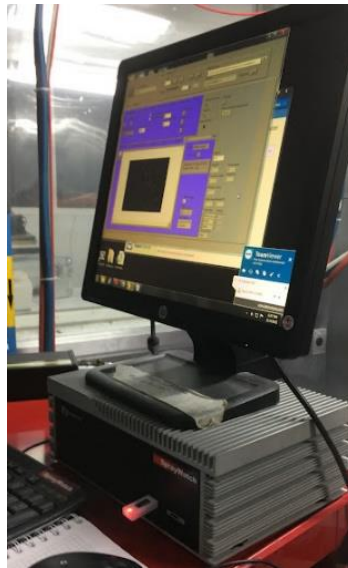


Figura 64. Computadora del equipo HiWatch, elaboración propia.

La configuración para realizar el diagnóstico se puede apreciar en la Figura 65.



Figura 65. Instalación y configuración del equipo HiWatch para realizar la medición de velocidad de las partículas (izquierda), y vista lateral de la configuración del mismo equipo para la medición de la velocidad de las partículas cerca del sustrato (derecha).

Este equipo realiza la medición de la velocidad de las partículas a través de la toma de varias fotografías, en donde se busca capturar “tripletes” de una partícula; es decir, el software toma 3 fotografías esperando capturar la misma partícula tres veces, pero en diferente posición, de esta manera puede calcular la velocidad de la partícula, ver Figura 66.

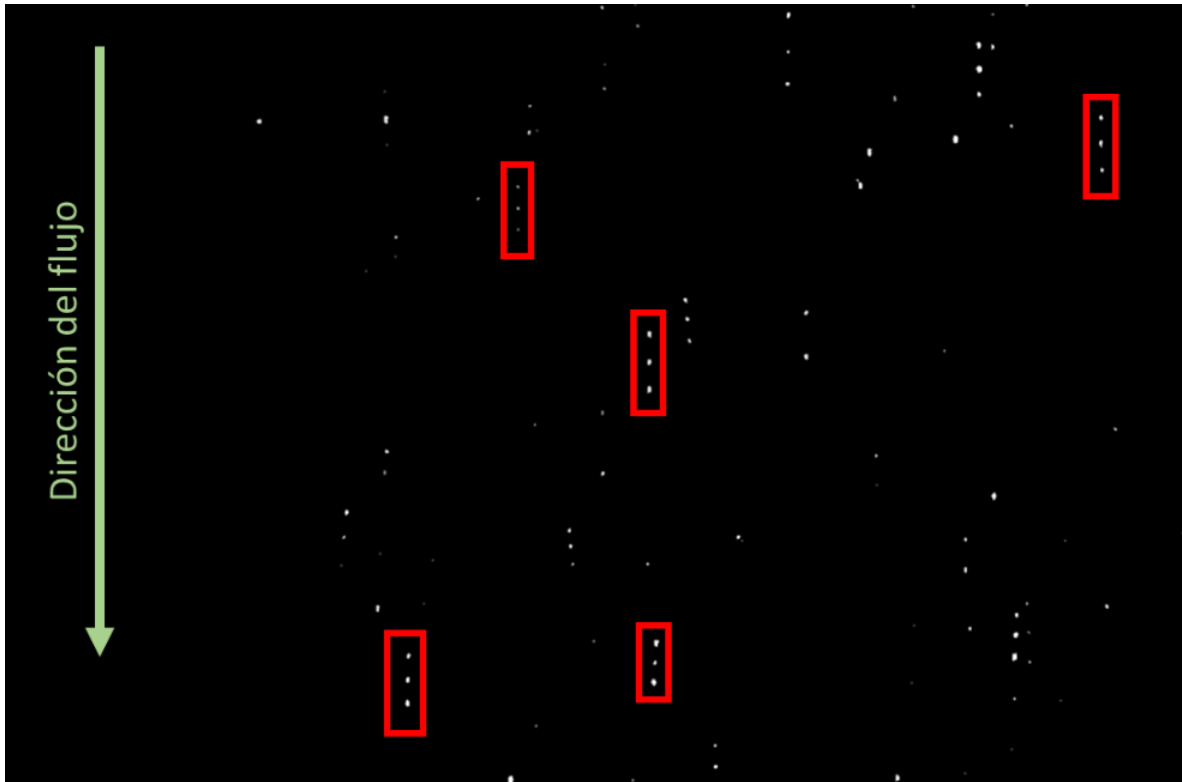


Figura 66. Ejemplo de tripletes identificados, dirección del flujo de las partículas.

Una vez capturadas las imágenes, se procesan en el software “Oseir Spray”, aquí se definen los parámetros de procesamiento de las imágenes, dentro de los cuales destacan, el tipo de fondo de la imagen, las partículas esperadas en el conteo, entre otras.

Otras técnicas de caracterización utilizadas

Microscopía

Con ayuda de un microscopio digital (marca KEYENCE serie VHX-6000), se obtuvieron microscopías (a 200x) de los recubrimientos obtenidos, con el objetivo de observar la superficie de dichos recubrimientos, y así relacionarlo directamente con las condiciones de rociado empleadas. Figuras 67 y 68.

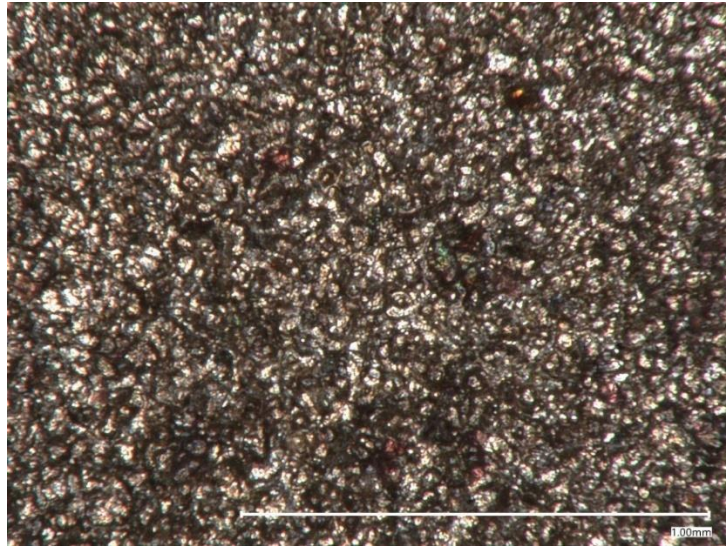


Figura 67. Micrografía (200x) de la superficie del recubrimiento obtenido en la corrida N1, elaboración propia.

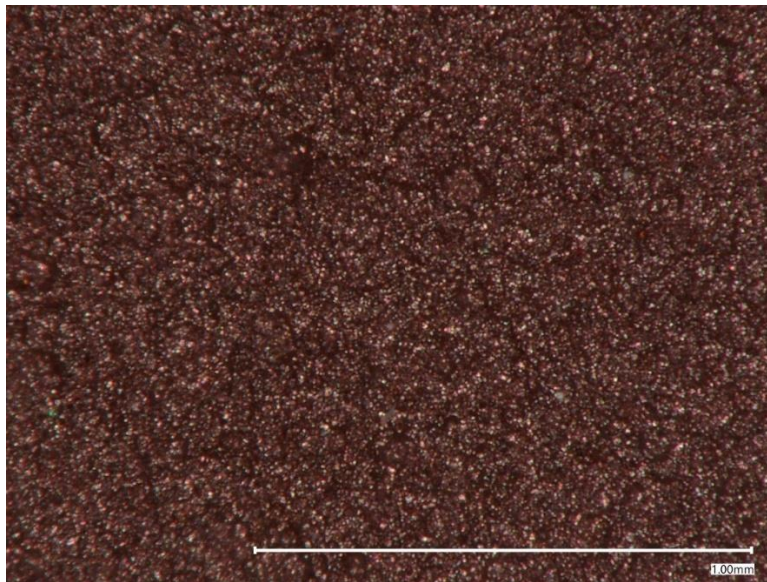


Figura 68. Micrografía (200x) de la superficie del recubrimiento obtenido en la corrida N9, elaboración propia.

Resultados y Discusión

A partir de las pruebas de caracterización realizadas se obtuvieron las propiedades de los recubrimientos obtenidos. Estos resultados los relacionamos con el efecto que tienen los dos tipos de geometrías utilizadas en el proceso experimental.

Eficiencia de depósito

De las medidas realizadas de la masa de los sustratos antes y después del recubrimiento, así como la estimación de la masa de polvo que es proyectada hacia el sustrato al paso de la boquilla, se calcula la eficiencia de depósito de cada corrida, se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Eficiencias de depósito.

Corrida	Condiciones de rociado	Sustrato	DE (%)
N1	Boquilla Rectangular / SOD 12.5 mm	11	18.672
N2	Boquilla Rectangular / SOD 22.5mm	12	20.767
N3	Boquilla Rectangular / SOD 22.5mm	13	20.228
N4	Boquilla Rectangular / SOD 12.5mm	14	20.401
N9	Boquilla circular / SOD 12.5mm	21	45.2596
N10	Boquilla circular / SOD 22.5mm	22	39.015
N11	Boquilla circular / SOD 22.5mm	23	27.316
N12	Boquilla circular / SOD 12.5mm	24	26.913

En la Figura 69, se muestra el gráfico de la eficiencia de depósito en función del tipo de boquilla y la distancia de rociado (SOD), podemos observar que haciendo uso de la boquilla redonda es posible alcanzar una mayor eficiencia de depósito.

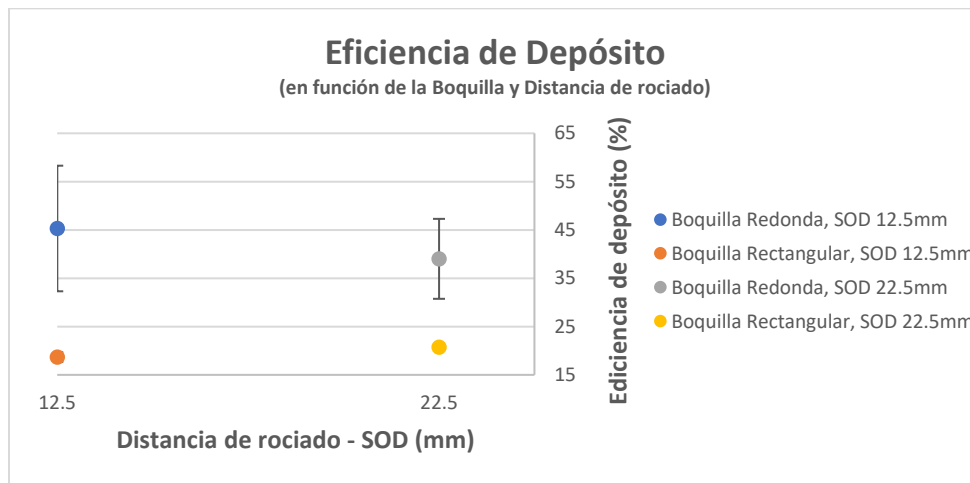


Figura 69. Gráfica de eficiencia de depósito en función de SOD y boquilla, elaboración propia.

Velocidad de las partículas

De acuerdo con los resultados de las pruebas de diagnóstico realizadas mediante el equipo HiWatch, se observa que la velocidad de las partículas es mayor cuando se emplea la boquilla redonda, que cuando se utiliza la boquilla rectangular. Si bien, de acuerdo con la revisión de la literatura, muestra que, una relación de expansión y longitud de la zona divergente mayores permiten una mayor velocidad, en este caso no sucede de esta manera, debido a la baja presión del sistema no es posible, ya que se requeriría una mayor presión de estancamiento.

Micrografías de los recubrimientos

De acuerdo con los resultados de eficiencia de depósito de estas dos muestras, encontramos que la corrida N1 fue realizada con la boquilla rectangular, y la corrida N2 fue realizada con la boquilla redonda, siendo sus eficiencias de depósito 18.672% y 45.259%, respectivamente. En las micrografías obtenidas podemos observar una clara diferencia en la apariencia de la superficie, donde se encuentra menos rugosa la superficie del recubrimiento fabricado con la boquilla redonda, esto debido a que con esta boquilla las partículas alcanzan mayor velocidad, causando una mejor deformación y adhesión de las partículas, y en consecuencia menor porosidad y rugosidad de la superficie. De forma contraria, la rugosidad es mayor en la superficie del recubrimiento fabricado con la boquilla rectangular, debido a la baja velocidad que alcanzan las partículas con esta boquilla.

Rugosidad de los recubrimientos

Los resultados obtenidos mediante la caracterización realizada, revelan una rugosidad menor cuando se emplea la boquilla redonda, con un valor máximo de $304.93 \mu m$; mientras que la rugosidad máxima encontrada en el recubrimiento fabricado con la boquilla rectangular es de $924.88 \mu m$, estos resultados los podemos observar en la Figura 70 y la Figura 71, respectivamente.

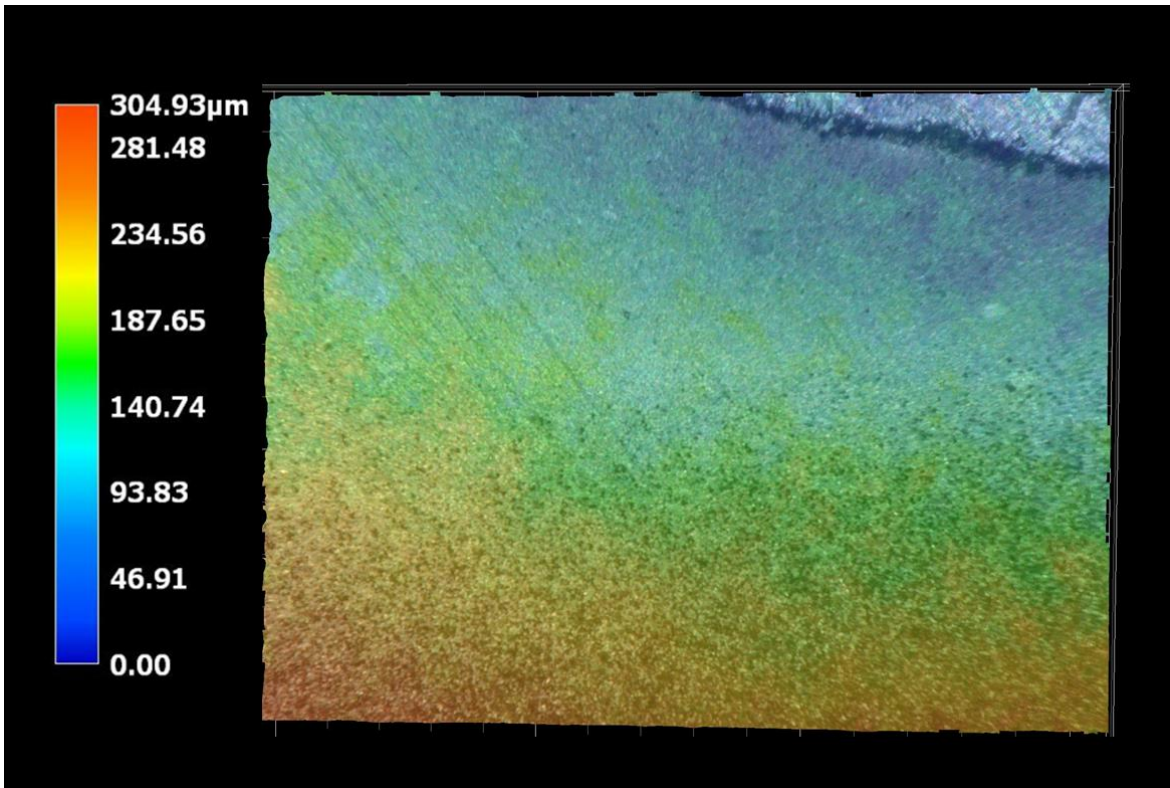


Figura 70. Rugosidad del recubrimiento N9, fabricado con la boquilla circular, elaboración propia.

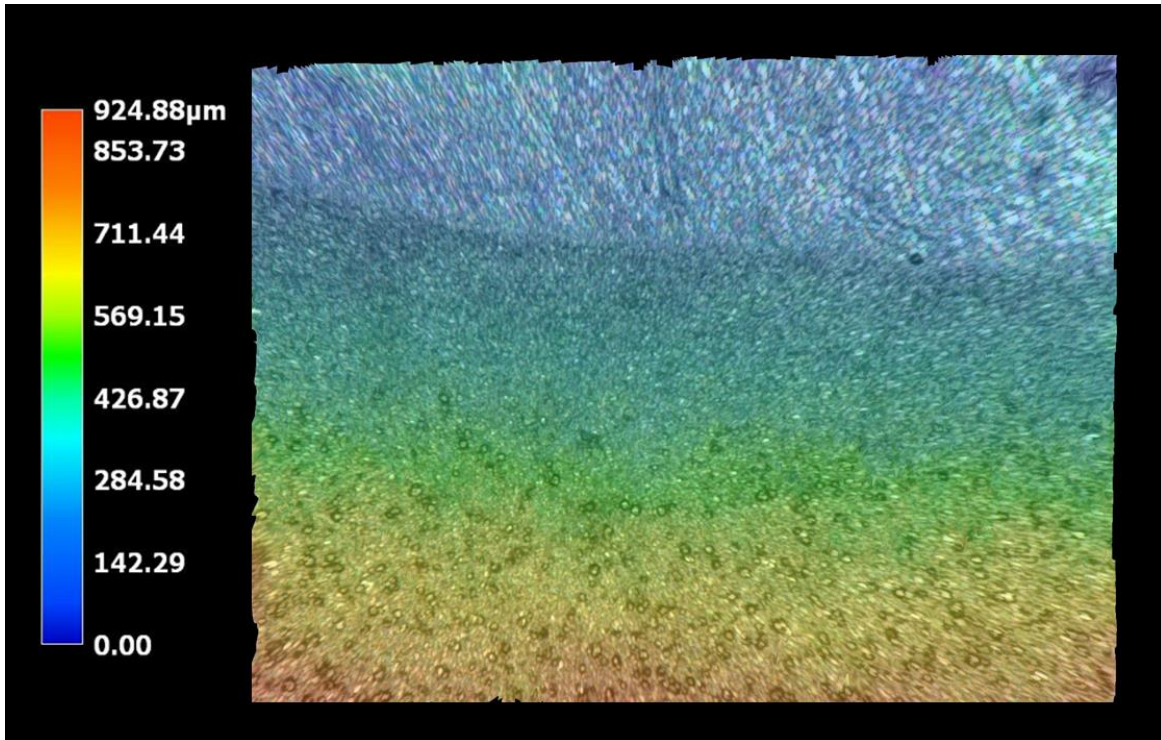


Figura 71. Rugosidad del recubrimiento N1, fabricado con la boquilla rectangular, elaboración propia.

Pruebas con software KSS® (Kinetic Spray Solutions)

Se realizaron pruebas con el software KSS, con el fin de predecir diferentes respuestas del proceso; como anteriormente se describe, el software permite la configuración de diferentes parámetros de procesamiento, los cuales fueron seleccionados de acuerdo al set experimental planteado.

Los resultados obtenidos predicen una mayor eficiencia de depósito con las partículas de menor tamaño (Praxair); la cual, según el software, utilizando esta configuración se esperaría una eficiencia de depósito mayor al 90%, ver Figuras 72-75. Estos resultados se utilizaron para finalmente elegir el polvo de Cobre de la marca Praxair®, así mismo fue posible obtener una primera estimación de los parámetros de procesamiento a utilizar, así como los valores esperados, tal como la velocidad, temperatura de las partículas.

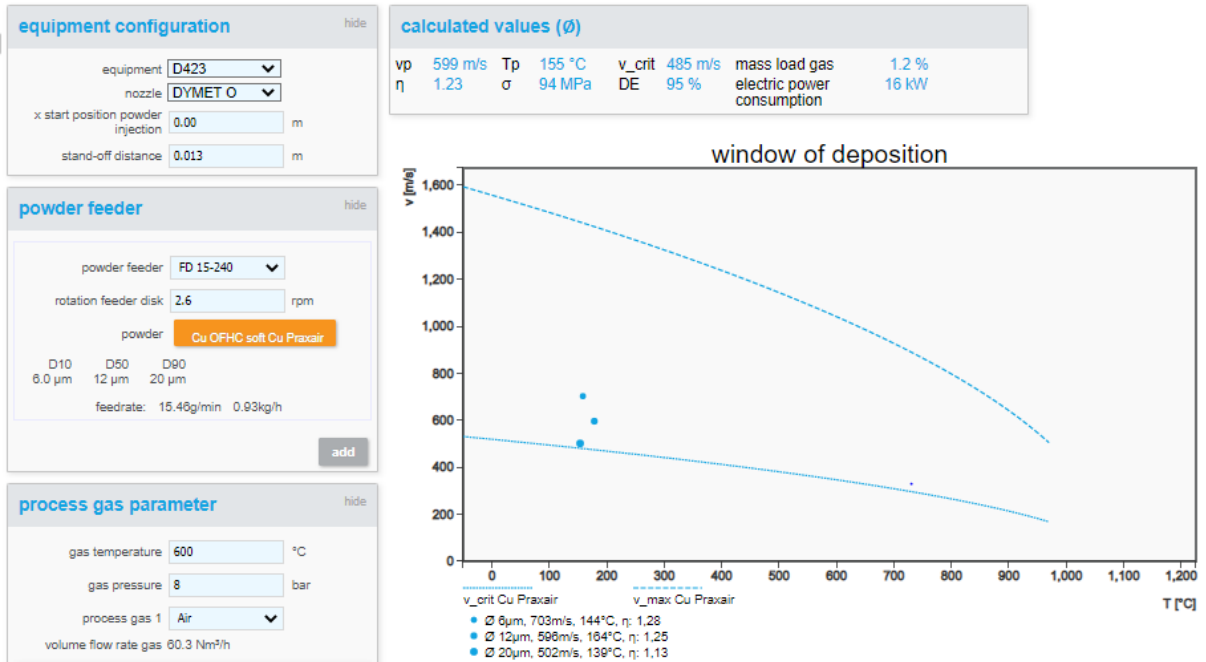


Figura 72. Resultados obtenidos con los parámetros de rociado propuestos, una distancia de 12.5mm y boquilla circular.

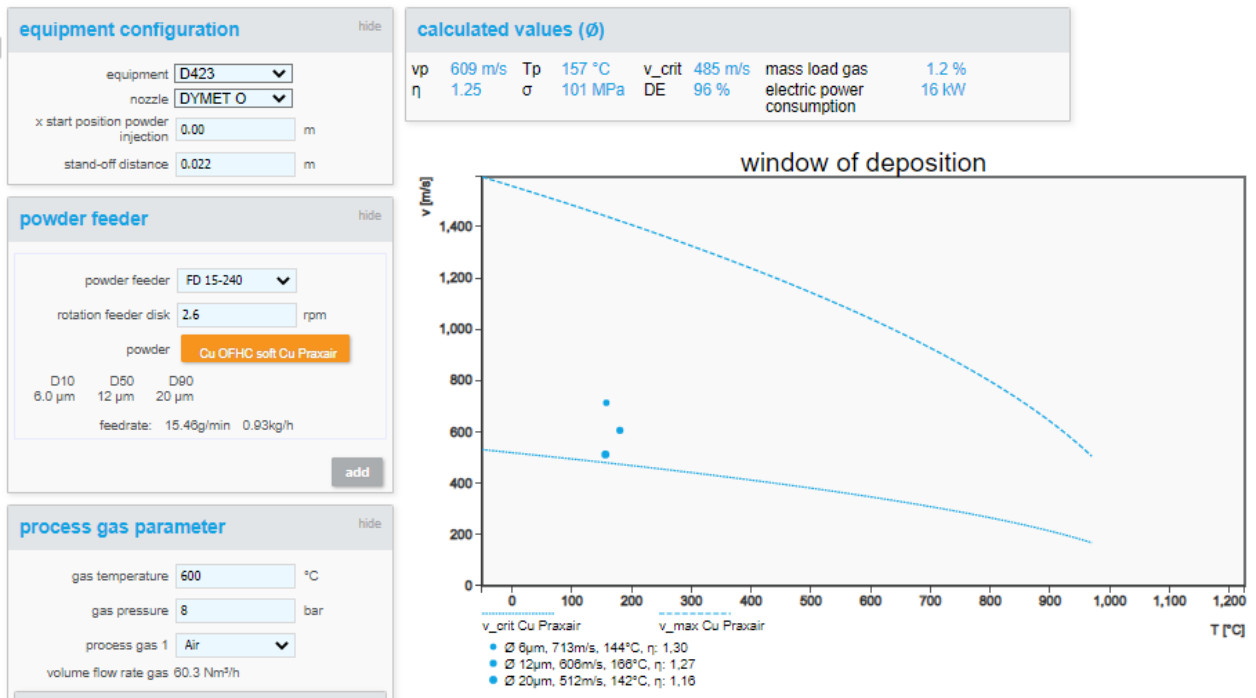


Figura 73. Resultados obtenidos con los parámetros de rociado propuestos, una distancia 22.5mm y boquilla circular.

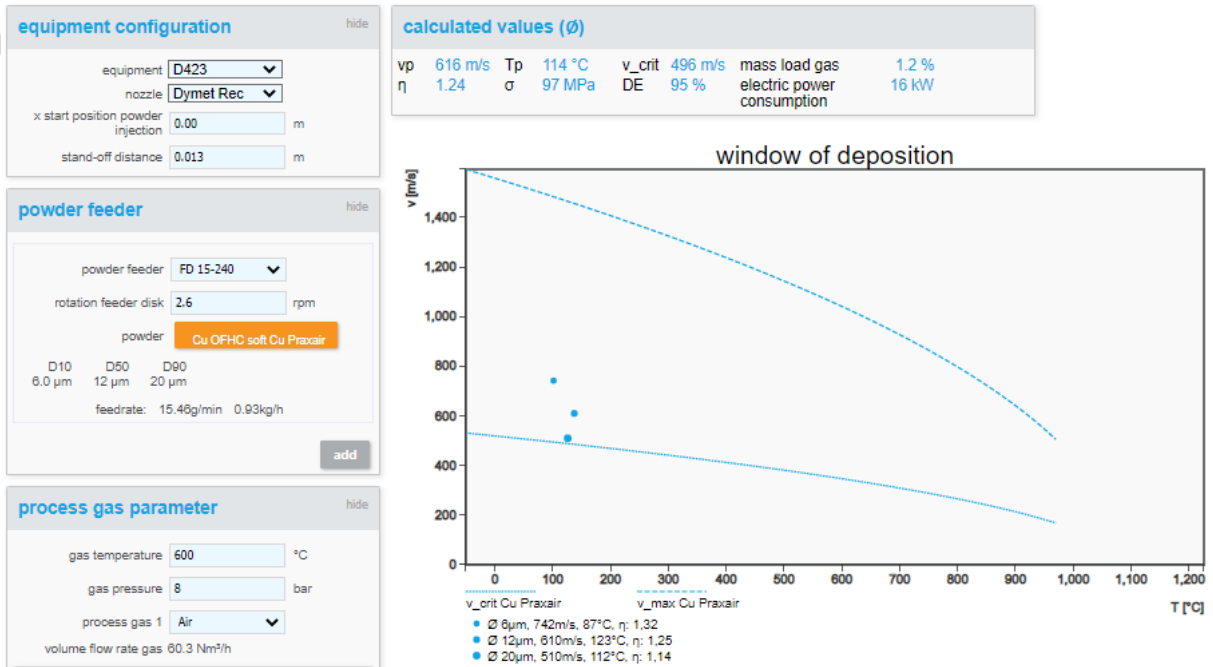


Figura 74. Resultados obtenidos con los parámetros de rociado propuestos, una distancia de 12.5mm y boquilla rectangular.

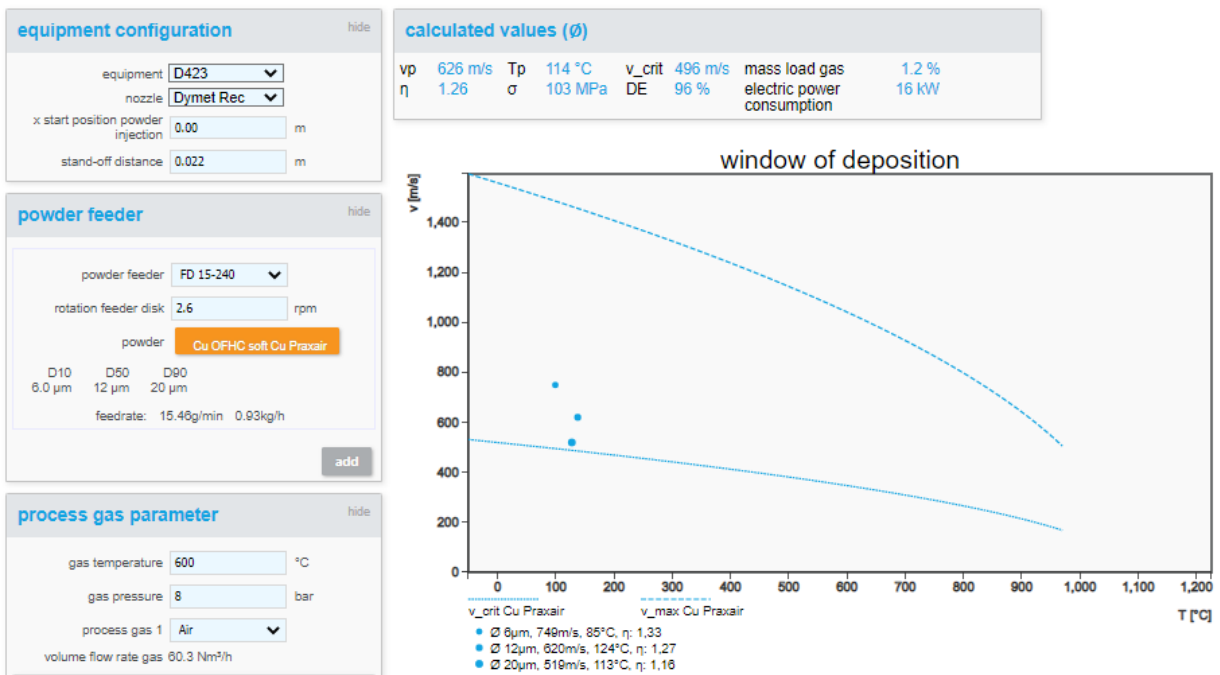


Figura 75. Resultados obtenidos con los parámetros de rociado propuestos, una distancia 22.5mm y boquilla rectangular.

El software permite también, comparar de forma sencilla los resultados de cada simulación, obteniendo así, una visualización más amigable y de gran valor para el usuario.



Figura 76. Comparación de los resultados obtenidos, variando el tipo de boquilla y la distancia de rociado.

“Dymet O” se refiere a la boquilla redonda, y “Dymet Rec” es para la boquilla rectangular. La comparación de los resultados obtenidos se puede observar mediante una útil herramienta del software KSS®, tal como se muestra en la Figura 76. Los resultados se muestran de forma condensada en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de los cálculos realizados por el software KSS, comparando la variación de la boquilla y las distancias de rociado.

Respuesta	Dymet O SOD 12.5mm	Dymet O SOD 22.5mm	Dymet Rec SOD 12.5mm	Dymet Rec SOD 22.5mm
Vp (m/s)	599	608	616	625
Tp (°C)	155	157	114	114
V_crit (m/s)	485	485	496	496
η	1.23	1.25	1.24	1.26
σ (MPa)	94	101	97	103
DE (%)	95	96	95	96

A continuación, se muestran una serie de gráficos elaborados con los resultados obtenidos mediante el software KSS, con el fin de identificar efectos de los factores evaluados, entre ellos la distancia de rociado y tipo de boquilla.

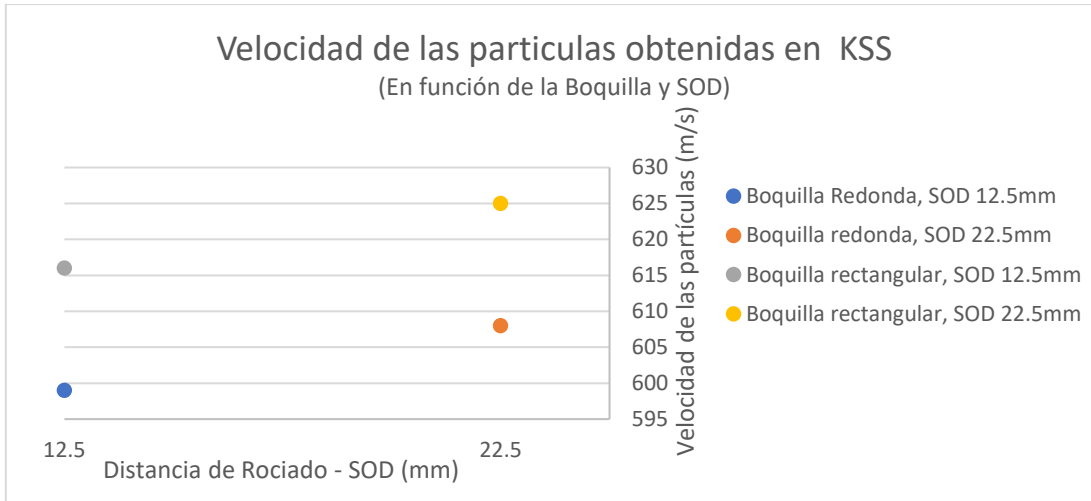


Figura77. Grafica que muestra la velocidad de las partículas obtenida mediante el software KSS®, en función del tipo de boquilla y distancia de rociado, elaboración propia.

De la Figura 77, observamos que el software KSS predice que la velocidad de las partículas tiende a aumentar con la distancia de rociado. Así mismo, la velocidad es mayor cuando se utiliza la boquilla rectangular en ambos casos de la distancia de rociado.

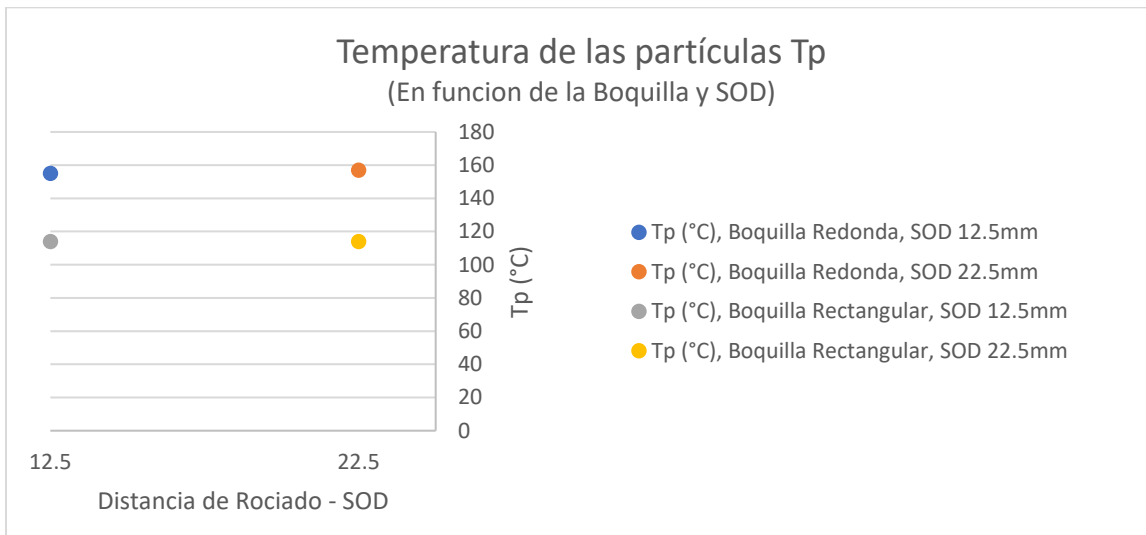


Figura 78. Temperatura de las partículas en función del tipo de boquilla y distancia de rociado, elaboración propia.

Los resultados que se muestran en las Figuras 77, 78 y en la Tabla 16, revelan información importante que permite relacionarla directamente con el efecto provocado por la distancia de rociado y las dos boquillas utilizadas, claramente se puede ver que, según el software KSS®, las partículas alcanzan mayor velocidad al utilizar la boquilla rectangular, esto puede relacionarse directamente con la longitud de la sección divergente. Así mismo, podemos encontrar que la mayor temperatura que alcanzan las partículas es cuando se emplea la boquilla redonda, de igual manera, esto se puede relacionar con la longitud de la sección divergente de las boquillas utilizadas.

Comparación de los resultados obtenidos de forma experimental VS resultados KSS

En la Figura 79, observamos que la eficiencia de depósito esperada para las condiciones utilizadas supera el 95%, esto difiere ampliamente de los que se obtuvo en el desarrollo experimental, donde no se obtuvo más de un 50% de eficiencia de depósito; esto se puede deber a diferentes causas, en su mayoría son diferencias entre el software y la realidad del proceso experimental; tal como:

- La diferencia entre la entrada de las partículas en la boquilla, ya que en el proceso experimental la entrada de las partículas es de forma perpendicular al flujo, a diferencia de la configuración en el software, la cual es axial.
- Según lo observado y explorado del software KSS, este está diseñado principalmente para calcular procesos de alta presión (HPCS), por lo que esto significa una gran diferencia con el equipo real utilizado en el proceso experimental.

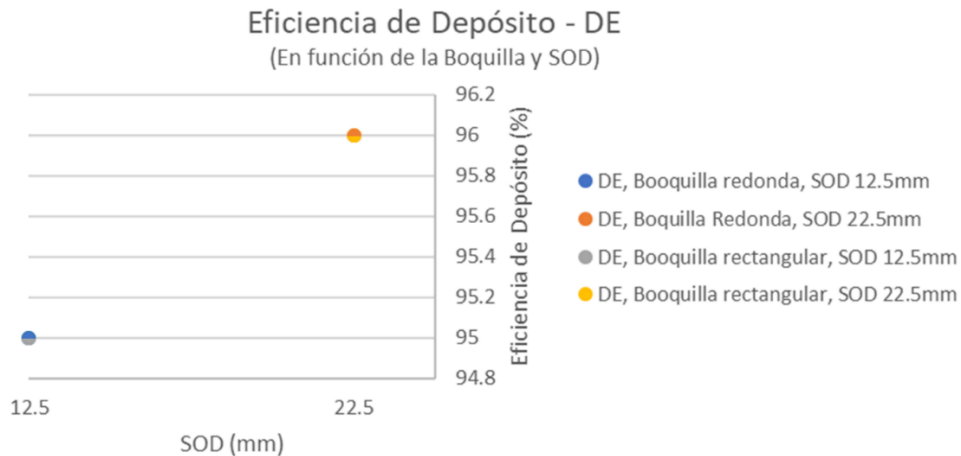


Figura 79. Eficiencia de depósito obtenida mediante el software KSS, en función de la boquilla utilizada y la distancia de rociado, elaboración propia.

Conclusiones

- El proceso de CS forma parte de un campo con un fructífero potencial para la industria mexicana, desde la industria aeroespacial hasta la biomédica, con diversas aplicaciones.
- Actualmente se encuentra extensa documentación del proceso del Cold Spray cubriendo varios aspectos, desde su estudio experimental (haciendo uso de diferentes materiales para diferentes industrias, en especial aquellas que emplean materiales que son sensibles a la oxidación y a las altas temperaturas), hasta su estudio teórico en donde se emplean diferentes métodos y modelos para calcular y estimar el comportamiento del proceso.
- La velocidad de las partículas es afectada por la geometría y dimensiones de las boquillas empleadas en el proceso de CS, lo cual se debe principalmente a las relaciones de expansión, y longitud de la sección divergente.

- La boquilla de Laval juega un papel crucial en el proceso de Cold spray, ya que este dispositivo acelera a velocidades supersónicas los diferentes materiales en forma de partículas, los cuales serán depositados para crear recubrimientos, reparación de piezas, o piezas completas con elevadas propiedades mecánicas.
- Según la información recabada, se observa que la longitud de la sección divergente tiene un gran efecto en la velocidad que alcanzan las partículas, esto sigue la tendencia de que a medida que aumenta la longitud de la sección divergente, aumenta la velocidad de las partículas, sin embargo, un aumento excesivo representa la disminución de la velocidad de las partículas.
- La relación de expansión de las boquillas representa un factor crítico, ya que, al aumentarla desmesuradamente, este factor puede causar la aparición de ondas de choque dentro de la boquilla, resultando en la desaceleración de las partículas, efecto totalmente indeseable.
- De acuerdo con los resultados experimentales, se observa que las partículas alcanzan mayores velocidades cuando se utiliza la boquilla redonda. Si bien la boquilla rectangular cuenta con una mayor relación de expansión y longitud de la sección divergente, esta requeriría de una mayor presión para que las partículas logren una mayor aceleración.
- Con los resultados que revelan las imágenes obtenidas en el microscopio, se encuentra que la superficie del recubrimiento fabricado con la boquilla redonda es menos rugosa (máx. $304.93 \mu m$), mientras que la rugosidad máxima encontrada en el recubrimiento fabricado con la boquilla rectangular es de $924.88 \mu m$. Esto se relaciona directamente con la velocidad que alcanzan las partículas, donde un factor determinante es la geometría de las boquillas, dado los recubrimientos evaluados fueron fabricados con las mismas condiciones de operación, modificando solamente la geometría de las boquillas empleadas.
- Para sistemas de alta presión, también influye significativamente la longitud de la sección convergente y el punto de entrada de las partículas, ya que esto determina la temperatura que alcanzan las partículas.
- Existen dimensiones de las boquillas que son óptimas, las cuales dependen del material y gas utilizado durante el proceso, por lo que, el uso de una sola boquilla para diferentes materiales puede resultar en un proceso ineficiente.
- Los problemas relacionados con la geometría de la boquilla de Laval para el proceso de CS, han llevado a la búsqueda de soluciones, tal es el caso de la patente de una boquilla de geometría variable, que busca hacer más eficiente el proceso de CS, ya que se puede adaptar a las condiciones de procesamiento que se demanden.

Recomendaciones / trabajo futuro

- Se han presentado estudios importantes que permiten conocer mejor el desempeño de las boquillas de Laval en el proceso de Cold Spray, sin embargo, aún hay retos importantes que requieren estudio, como lo es la aglomeración de las partículas dentro de las boquillas o bien, la degradación de estas mismas toberas debido a la combinación entre presión y temperatura de los gases que arrastran y calientan a las partículas que son procesadas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos podemos observar que este cálculo no es del todo certero, por lo que se propone revisar el artículo: "Measurements of Cold Spray Deposition Efficiency" [60] esperando encontrar un método más adecuado y preciso para estimar la eficiencia de depósito.
- Mediante el estudio del efecto de las boquillas de Laval, se pueden establecer números adimensionales y relaciones que permitan diseñar boquillas de Laval de manera sencilla y efectiva, que satisfagan de manera óptima las necesidades del proceso y sus variables.

Bibliografía

- [1] G. Dutrénit, *Política de Innovación para Fortalecer las Capacidades en Manufactura Avanzada en México*. 2015.
- [2] C. BERRA BARONA and M. RAMÍREZ RAMÍREZ, "Análisis del sector manufactura en México," *Criterio Libre*, vol. 18, no. 31. pp. 167–182, 2019.
- [3] M. Sandoval, C. Carreón, O. Humberto, and M. Moreno, "Mapa de ruta de diseño, ingeniería y manufactura avanzada," 2011.
- [4] A. Vardelle *et al.*, "The 2016 Thermal Spray Roadmap," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 25, no. 8, pp. 1376–1440, 2016.
- [5] V. K. Champagne, *The cold spray materials deposition process: Fundamentals and applications*. 2007.
- [6] C. J. Li, W. Y. Li, and H. Liao, "Examination of the critical velocity for deposition of particles in cold spraying," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, no. 2. pp. 212–222, Jun-2006.
- [7] S. T. Oyinbo and T. C. Jen, "A comparative review on cold gas dynamic spraying processes and technologies," *Manuf. Rev.*, vol. 6, pp. 11–13, 2019.
- [8] P. Vuoristo, *Thermal Spray Coating Processes*, vol. 4. Elsevier, 2014.
- [9] V. F. Kosarev, S. V. Klinkov, A. P. Alkhimov, and A. N. Papyrin, "On some aspects of gas dynamics of the cold spray process," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 265–281, 2003.

- [10] S. V. Klinkov, V. F. Kosarev, and V. S. Shikalov, "Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 367, no. September 2018, pp. 231–243, 2019.
- [11] R. Lupoi, M. Meyer, W. W. Wits, and S. Yin, "The role of particles flow characteristics in the performance of cold spray nozzles," *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 189–192, 2020.
- [12] K. Sakaki, "The influence of nozzle design in the cold spray process," *Cold Spray Mater. Depos. Process Fundam. Appl.*, pp. 117–126, 2007.
- [13] H. Assadi *et al.*, "On parameter selection in cold spraying," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 1161–1176, 2011.
- [14] N. Ua and P. Or, "PCAST_Advanced Manufacturing_2012."
- [15] INEGI, "Valor Agregado de Exportación de la Manufactura Global." [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/temas/pibval/>. [Accessed: 17-Aug-2021].
- [16] A. Vardelle *et al.*, "The 2016 Thermal Spray Roadmap," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 25, no. 8, pp. 1376–1440, 2016.
- [17] "INDUSTRIA AEROSPAZIAL MEXICANA MAPA DE RUTA 2014 PLAN NACIONAL DE VUELO."
- [18] S. Kuroda, M. Watanabe, K. Kim, and H. Katanoda, "Current status and future prospects of warm spray technology," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 653–676, 2011.
- [19] L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. 2008.
- [20] N. Espallargas, *Future development of thermal spray coatings: Types, designs, manufacture and applications*. 2015.
- [21] P. Fauchais and G. Montavon, "Thermal and cold spray: Recent developments," *Key Eng. Mater.*, vol. 384, pp. 1–59, 2008.
- [22] P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, and M. I. Boulos, *Thermal Spray Fundamentals*. 2014.
- [23] S. H. Thurston, "Method of Impacting One Metal Upon Another, United States Patent Office," 1900.
- [24] M. Schoop, "Method of Plating or Coating with Metallic Coatings, United States Patent Office," 1915.
- [25] C. F. Rocheville, "Device for treating the surface of a workpiece," *Us3100724*, pp. 1–6, 1963.
- [26] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, and V. M. Fomin, *Cold Spray Technology*. Elsevier Ltd, 2007.
- [27] P. Anatoly, "GAS-DYNAMIC SPRAYING METHOD FOR APPLYING A COATING," 1994.
- [28] A. Papyrin, "Cold spray produces high quality coatings for a wide spectrum of applications," *Adv. Mater. Process.*, no. September, pp. 49–51, 2001.
- [29] F. S. Da Silva, N. Cinca, S. Dosta, I. G. Cano, J. M. Guilemany, and A. V. Benedetti, "Cold gas spray coatings: Basic principles, corrosion protection and applications," *Eclat. Quim.*, vol. 42, no. 1, pp. 9–32, 2017.

- [30] R. Gr. Maev and V. Leshchynsky, *Cold Gas Dynamic Spray*. CRC Press, 2016.
- [31] H. Singh, T. S. Sidhu, S. B. S. Kalsi, and J. Karthikeyan, "Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 35, no. 3, pp. 231–245, 2013.
- [32] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, and H. Kreye, "Bonding mechanism in cold gas spraying," *Acta Mater.*, vol. 51, no. 15, pp. 4379–4394, Sep. 2003.
- [33] T. H. V. Steenkiste, J. R. Smith, and R. E. Teets, "Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 154, pp. 237–252, 2002.
- [34] T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi, and H. Kreye, "Development of a generalized parameter window for cold spray deposition," *Acta Mater.*, vol. 54, no. 3, pp. 729–742, 2006.
- [35] S. Yin, M. Zhang, Z. Guo, H. Liao, and X. Wang, "Numerical investigations on the effect of total pressure and nozzle divergent length on the flow character and particle impact velocity in cold spraying," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 232, pp. 290–297, 2013.
- [36] H. Assadi, H. Kreye, F. Gärtner, and T. Klassen, "Cold spraying – A materials perspective," *Acta Mater.*, vol. 116, pp. 382–407, 2016.
- [37] A. Foelsche, "Nozzle Clogging Prevention and Analysis in Cold Spray," 2020.
- [38] S. Yin, M. Meyer, W. Li, H. Liao, and R. Lupoi, "Gas Flow, Particle Acceleration, and Heat Transfer in Cold Spray: A review," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 874–896, 2016.
- [39] X. Wang, B. Zhang, J. Lv, and S. Yin, "Investigation on the Clogging Behavior and Additional Wall Cooling for the Axial-Injection Cold Spray Nozzle," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 696–701, 2015.
- [40] M. Siopsis and et al., "Study of Nozzle Clogging During Cold Spray," *Cold Spray Action Team Meeting*. 2017.
- [41] H. Tronsson and H. C. Tronsson, "Feasibility of Electric Field Assisted Clogging Reduction in Cold Feasibility of Electric Field Assisted Clogging Reduction in Cold Gas Spraying Nozzle Gas Spraying Nozzle," 2020.
- [42] Y. Cengel and J. Cimbala, "Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones," *Mc Graw Hill*, vol. 1, no. 9, p. 997, 2006.
- [43] J. J. Park *et al.*, "Supersonic nozzle flow simulations for particle coating applications: Effects of shockwaves, nozzle geometry, ambient pressure, and substrate location upon flow characteristics," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 514–522, 2011.
- [44] J. Pattison, S. Celotto, A. Khan, and W. O'Neill, "Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 202, no. 8, pp. 1443–1454, Jan. 2008.
- [45] F. M. White, *Mecánica de fluidos*, 5ta ed. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 2004.
- [46] D. R. Zemansky Mark, *Calor y Termodinámica*, Sexta. 1986.
- [47] J. Villafuerte, *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications*. Springer

International Publishing, 2015.

- [48] NASA, "Conservation of Momentum." [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/conmo.html>. [Accessed: 04-Sep-2021].
- [49] NASA, "Nozzle Design." [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/nozzle.html>. [Accessed: 04-Sep-2021].
- [50] R. C. Dykhuizen and M. F. Smith, "Gas Dynamic Principles of Cold Spray," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 205–212, 1998.
- [51] A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, and S. V. Klinkov, "The features of cold spray nozzle design," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 375–381, 2001.
- [52] M. Grujicic, C. Tong, W. S. DeRosset, and D. Helfritsch, "Flow analysis and nozzle-shape optimization for the cold-gas dynamic-spray process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 217, no. 11, pp. 1603–1613, 2003.
- [53] W. Y. Li, H. Liao, G. Douchy, and C. Coddet, "Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 7, pp. 2129–2137, 2007.
- [54] S. Yin, X. fang Wang, and W. ya Li, "Computational analysis of the effect of nozzle cross-section shape on gas flow and particle acceleration in cold spraying," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 8–9, pp. 2970–2977, 2011.
- [55] M. Meyer and R. Lupoi, "An analysis of the particulate flow in cold spray nozzles," *Mech. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 127–136, 2015.
- [56] R. Lupoi, M. Meyer, W. W. Wits, and S. Yin, "The role of particles flow characteristics in the performance of cold spray nozzles," 2020.
- [57] Dycomet, "Operator's Manual, DYMET model 423." Netherlands, 2012.
- [58] Sympatec, "HELOS-BR-RODOS-VIBRI." [Online]. Available: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/helos/helos-br-rodos-vibri/>. [Accessed: 17-Dec-2021].
- [59] Oseir Ltd, "HiWatch Compact. Safety, Installation and Maintance." 2013.
- [60] S. V. Klinkov and V. F. Kosarev, "Measurements of cold spray deposition efficiency," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 364–371, 2006.