

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Dirección de Posgrado



*DESARROLLO DE UN PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO EN  
FRÍO A ALTA PRESIÓN (HPCS) UTILIZANDO UN RECUBRIMIENTO  
INCONEL 625 SOBRE UN SUSTRATO PLANO DE HIERRO GRIS  
ASTM 48 CLASE 40*

TESIS QUE PRESENTA

**Ing. Martha Karina Flores Esparza**

ASESORES

**Dr. John Edison García Herrera**

**Dr. Raúl Pérez Bustamante**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA**

San Luis Potosí, San Luis Potosí  
noviembre 2020

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 17 de agosto del 2020.

**Mtro. Geovany González Carlos**  
Coordinador Académico de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Posgrado en Maestría de Manufactura Avanzada y Martha Karina Flores Esparza, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO EN FRÍO A ALTA PRESIÓN (HPCS) EN UN RECUBRIMIENTO INCONEL 625 SOBRE UN SUSTRATO PLANO DE HIERRO GRIS ASTM 48 CLASE 40" autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de Maestría.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Handwritten signature of Dr. John Edison García Herrera.

Dr. John Edison García Herrera  
Asesor Académico

Handwritten signature of Dr. Raúl Pérez Bustamante.

Dr. Raúl Pérez Bustamante  
Asesor en Planta

Handwritten signature of MBA, José Luis Velázquez Acosta.

MBA, José Luis Velázquez Acosta  
Asesor en Planta

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Querétaro, Querétaro 25 de Noviembre del 2020

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero  
Directora de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal de la alumna **Martha Karina Flores Esparza**, cuyo título es:

"Desarrollo de un proceso de rociado térmico en frío a alta presión (HPCS) utilizando un recubrimiento de Inconel 625 sobre un sustrato plano de hierro gris ASTM 48 clase 40"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con la alumna, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. John Dairo Henao Penderrey  
Catedrático CONACYT

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis queridos y extraordinarios padres, quienes son los pilares principales de mi vida.

A mis excelentes hermanos Braulio y Edgardo que los quiero con todo mi corazón.

A mon amour inconditionnel, ma petite princesse Sophie Amélie, qui m'attend toujours patiente chaque soir avec un grand sourire. Pour être mon inspiration et m'avoir permis de grandir en tant qu'Ingénieur en Science des Matériaux.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Cummins y a Jose Luis Velázquez Acosta por confiar en mi para desarrollar este proyecto.

Agradezco a CIATEQ que me permitió ser parte de su institución como alumno, a mis profesores y a mis tres asesores de: Dr. John Edison García, el Dr. Raúl Pérez Bustamante y el Dr. John Dairo Henao Penenrey, tesis por su tiempo y dedicación a este trabajo.

## RESUMEN

Cummins ReCon® Remanufactura y suministra una variedad de componentes totalmente reacondicionados según las especificaciones que sean requeridas para los motores y las necesidades de servicio de campo, de esta forma, Cummins ofrece una alternativa más asequible y de alta calidad en la compra de sus productos. El presente documento muestra el conjunto de procedimientos llevados a cabo para obtener un recubrimiento Inconel 625 por Rociado Térmico en Frío a Alta Presión (HPCS) sobre un sustrato plano base hierro gris ASTM A48 con el fin de analizar las propiedades mecánicas y químicas obtenidas del recubrimiento. La influencia de los parámetros en el proceso estuvo definidas a través de la simulación hecha en el software KSS, para posteriormente analizar las propiedades tribológicas y su resistencia al desgaste. El desarrollo fue llevado a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Cummins San Luis Potosí, que cuenta con un área de investigación dedicada a la Ingeniería de Superficies. Así, la optimización de las variables de proceso fueron el factor clave para encontrar el balance entre el costo y el beneficio en este proyecto.

El diseño de pruebas planteado abarcó las capacidades del equipo de HPCS y donde se consideraron como variables claves, la presión y la temperatura del proceso. Se trabajó en un rango de condiciones de presión entre 30 bar y 50 bar denominada presión mínima y máximas respectivamente. El rango de temperaturas estuvo definido en un rango de 900C y 1100C, establecido en este trabajo como temperatura mínima y máxima. El análisis del comportamiento mecánico en pruebas de adherencia definió el grado de adhesión de cada recubrimiento al ser procesados con condiciones de temperatura y presión específicas. El análisis de polvos, la morfología, la distribución de partículas y las metalografías fueron indispensables para verificar la capacidad del material propuesto y el proceso evaluado a sus máximas capacidades como tecnología y sus posibles aplicaciones.

Este trabajo comprendió también la estimación de la resistencia al desgaste del recubrimiento, específicamente bajo condiciones de rayado, desarrolladas

Únicamente en la mejor aplicación proveniente del proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión obtenido durante el desarrollo de las pruebas, la simulación realizada a través del software KSS y los resultados metalúrgicos analizados previamente.

La prueba se realizó basado en la norma ASTM G171, fue definida para una carga progresiva y lineal obteniendo COF favorable para las aplicaciones típicas sugeridas en Cummins Recon.

**Palabras clave:** Rociado Térmico en Frío a Alta Presión (HPCS); Modelado en Software KSS; Propiedades Mecánicas; Eficiencia del depósito

## ABSTRACT

Cummins ReCon® remanufactures and supplies a variety of fully reconditioned components for factory-controlled specifications for engine remanufacturing and field service needs, on this way, Cummins offers a more affordable and high-quality alternative to purchasing new parts. The present document describes the procedures defined to obtain an Inconel 625 coating by using the High Pressure Cold Thermal Spray (HPCS) technology applied on an ASTM A48 gray iron-based flat substrate to evaluate and analyze the coating chemical and mechanical properties obtained. The influence of the parameters in the process were linked with the simulation done in KSS software. In addition, the tribological properties and the coating wear resistance samples were analyzed. Operational process, the simulations done, and the post evaluations was developed and supported at Cummins Research and Development Center located in San Luis Potosí, considering this site for having all capabilities available in this research line. Thus, the variables process optimization was key to find the balance and the cost benefit in the project developed.

The proposed testing design covered the capabilities of the HPCS equipment hence, the pressure and temperature variables were considered as essential variables. Maximum and minimum pressure range for the operational process within this technology, were between 30 bar and 50 bar. The temperature range named as maximum and minimum respectively were 900C and 1100C. The mechanical performance was defined thru adhesion test established the resistance of each coating when the samples were processed with specific temperature and pressure conditions. The powder analysis, morphology, particle distribution and metallography were essential to verify the behavior and INCONEL 625 performance linked with the process selected, maximum results obtained as a technology and the possible applications.



This work also included the coating wear resistance, specifically under scratching conditions, developed only in the best application from the High Pressure Cold Thermal Spray process obtained during the development of the tests, the simulation carried out through KSS software and previously analyzed metallurgical results.

The test was performed based on the ASTM G171 standard, it was defined for a progressive and linear load obtaining favorable COF for the typical applications suggested in Cummins Recon.

**Keywords:** High Pressure Cold Spray (HPCS), KSS Software modeling, Mechanical properties, Deposition Efficiency (DE).

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS .....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.1.1. Cummins ReCon® .....	1
1.1.2. Selección de materiales .....	3
1.1.3. Inconel 625 .....	4
1.1.4. Rociado Térmico en Frío a Alta Presión - HPCS .....	4
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	6
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos .....	7
1.5. HIPÓTESIS .....	8
2. MARCO TEORICO.....	9
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS.....	9
2.1.1. Introducción al Rociado Térmico en Frío.....	11
2.1.2. Modelado y Simulación del Proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión .....	15
2.1.3. Modelado y simulación del impacto de partículas .....	18
2.1.3.1. Objetivos del modelado y mecanismo de unión a nivel microestructural.....	18
2.1.3.2. Fenómenos Físicos Subyacentes .....	19
2.1.3.2.1. Modelos de deformaciones y materiales.....	19
2.1.3.2.2. Disipación de energía y transferencia de calor .....	21
2.1.3.2.3. La inestabilidad de corte adiabático .....	22
2.1.3.2.4. Fenómenos microestructurales .....	23

2.1.3.3.	Métodos de modelado y simulación .....	23
2.1.3.3.1.	Resultado principal.....	24
2.1.3.3.1.1.	Deformación de partículas y fenómenos interfaciales.....	24
2.1.3.3.1.2.	Predicción de la velocidad crítica.....	26
2.1.3.4.	Modelado integrado .....	28
2.1.4.	Caracterización de los recubrimientos de Rociado Térmico en Frío. ..	33
2.2.	TRIBOLOGÍA .....	34
2.2.1.	Fricción.....	34
2.2.2.	Desgaste .....	36
2.2.2.1.	Desgaste Adhesivo .....	36
2.2.2.2.	Desgaste Abrasivo .....	36
2.2.2.3.	Desgaste por fatiga .....	36
2.2.2.4.	Desgaste por impacto.....	37
2.2.3.	Pruebas de desgaste por rasgado/rayado.....	38
2.2.4.	Mecanismos de falla en el sistema capa-sustrato durante una prueba de rayado .....	41
2.2.5.	Prueba de dureza de rasgado/rayado .....	44
2.2.6.	Prueba de adherencia por rasgado/rayado .....	44
3.	SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO EN FRÍO A ALTA PRESIÓN EN EL SOFTWARE KSS .....	45
3.1.	SOFTWARE DE SIMULACIÓN KSS (KINETIC SPRAY SOLUTIONS) .....	45
3.1.1.	Mapa de Selección de Parámetros (PSM) .....	45
3.1.2.	Simulación .....	46
3.1.3.	Literatura para consulta .....	48
3.2.	DEFINICIÓN DE VARIABLES PARA LA SIMULACIÓN DE HPCS A TRAVÉS DE KSS	48
3.3.	PROPIEDADES FÍSICAS DEL INCONEL 625.....	48
3.4.	SIMULACIÓN DE HPCS A TRAVÉS DE KSS PARA INCONEL 625 .....	49
3.4.1.	Cálculo del Mapa de Selección de Parámetros (PSM) .....	49
3.4.2.	PSM para el polvo metálico Inconel 625 .....	49
3.4.3.	Cálculo de las condiciones de impacto de partículas .....	50
3.4.4.	Resultados de las simulaciones obtenidas para los modelos de trabajo. 51	
3.4.4.1.	Modelo 1(6A1).....	51

3.4.4.2. Modelo 2(6A2) .....	55
3.4.4.3. Modelo 3(6A3) .....	59
3.4.4.4. Modelo 4(6A4) .....	63
4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN UTILIZANDO EL PROCESO OPERATIVO HPCS.....	68
4.1. PARÁMETROS OPERATIVOS .....	68
4.2. IDENTIFICACIÓN Y TRAZABILIDAD DE LAS MUESTRAS .....	68
4.3. METODOLOGÍA.....	69
4.3.1. Equipo utilizado Scratch Tester RST3 .....	69
4.3.1.1. Características del indentador.....	70
4.3.2. Parámetros de la prueba de rasgado .....	71
CONCLUSIONES .....	73
RECOMENDACIONES .....	77
APORTACIÓN DE LA TESIS .....	78
APORTACION SOCIAL .....	79
REFERENCIAS .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Rociado Térmico y recubrimientos .....	10
Figura 2. Diagrama del flujo de proceso de Rociado Térmico. El proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión utiliza un calentador de gas de alta presión y un alimentador de polvo de alta presión para inyectar el polvo de metálico hacia la garganta de la boquilla. Esto proporciona velocidades muy altas que permiten que este proceso deposite una amplia gama de metales y algunos otros materiales [17]. .....	12
Figura 3. Diagrama esquemático que ilustra los cambios en la velocidad, temperatura y presión del gas que fluye a través de una boquilla convergente-divergente (de Laval). Si la disminución de la presión a través de la garganta estrecha de la boquilla está por encima de un mínimo crítico, la velocidad del flujo en la sección divergente de la boquilla se vuelve supersónica ( $Mach > 1$ ) y la temperatura del gas cae a medida que aumenta la velocidad del flujo [17]. .....	12
Figura 4. Representación esquemática de la velocidad del gas y las partículas en zona de convergencia (subsónica), zona garganta (sónica) y zona divergente (supersónica) de una boquilla de HPCS [17]. .....	14
Figura 5. Variación Esfuerzo-Deformación para un material típico endurecido por trabajo durante un experimento de torsión. La Localización puede ocurrir durante un calentamiento adiabático en una zona de deformación suave, que es después de que el flujo de esfuerzos alcanzan el máximo [17]. .....	22
Figura 6. Concepto para la descripción completa del proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión mediante el modelado y verificación experimental posterior. El concepto describe un circuito cerrado desde las condiciones de impacto definidas por la dinámica de fluidos hasta las condiciones de unión y las propiedades de recubrimiento esperadas. La retroalimentación de las investigaciones experimentales se utiliza para mejorar las condiciones de impacto basadas en modelos. Las inserciones divididas muestran el impacto modelado del cobre sobre el acero en detalle, la formación prospectiva del recubrimiento y los detalles microestructurales. [17, 65]. .....	26
Figura 7. Desarrollo de Temperatura y Velocidad a lo largo del eje de la boquilla para nitrógeno como gas de proceso (g) y un tamaño de partículas de cobre (15), $T_0 = 593$ K, $p_0 = 2.5$ MPa. [17,62]. .....	28
Figura 8. Variación de la velocidad de impacto crítica con el tamaño de partícula de cobre. Las líneas continuas corresponden al modelo analítico, mientras que las líneas punteadas muestran el límite superior de la velocidad crítica, correspondiente a la adiabaticidad cero. Se supone que la temperatura de la partícula en el momento del impacto es de 300 K. La prueba de impacto corresponde a experimentos con balas de 20 mm [17]. .....	29

Figura 9. Variación de la velocidad de impacto de las partículas para partículas de cobre de diferentes tamaños (puntos de datos calculados numéricamente) en comparación con los valores obtenidos de las funciones de ajuste del número de Nusselt y la velocidad de la partícula [17]. .....30

Figura 10. Gráfica del impacto y Velocidades Críticas en función del diámetro de partícula calculado para dos condiciones de proceso diferentes en el Rociado Térmico en Frío de cobre. Tenga en cuenta que los rangos típicos de tamaño de partículas y las eficiencias de depósito son diferentes para los dos casos. DE, (Eficiencia de depósito) [17] .....30

Figura 11. Ventana de depósito ilustrada en el plano de velocidad de partícula y temperatura de partícula para polvo de titanio rociado con nitrógeno y boquilla tipo D24 a 4 MPa (580 psi). Los puntos de datos muestran las condiciones de impacto correspondientes a partículas de diferentes tamaños: (A) 10, (B) 25 y (C) 45  $\mu\text{m}$ . La línea inferior (azul) muestra la velocidad crítica y la línea superior (roja) muestra la velocidad de erosión [17]. .....31

Figura 12. Comportamiento de la fuerza cohesiva frente a la relación de velocidad para un recubrimiento de Titanio y un recubrimiento de Cu. Los valores medidos de la fuerza cohesiva normalizada de los recubrimientos de titanio rociados en frío como se representan frente a la relación de velocidad ajustada usando un factor de corrección de  $f = 1.06$  [17]. .....32

Figura 13. Concepto de modelado integrado, ilustrado mediante la definición del parámetro característico de Rociado Térmico en frío,  $\eta$  [17]. .....33

Figura 14. Ejemplificación de desgaste por fatiga.....37

Figura 15. a) Esquema de la prueba de rasgado/rayado "Scratch Test" y b) Gráfica típica del coeficiente de fricción en función de la carga aplicada. ....39

Figura 16. Clasificación de los diferentes mecanismos de falla provocados por un indentador esférico en un sistema capa-sustrato. Las partes oscuras son las zonas del sustrato que han quedado descubiertas [19].....43

Figura 17. Selección de gráfica en el Software KSS. ....46

Figura 19. Parámetros de entrada utilizados en los modelos de trabajo que se utilizaron en la simulación con el software KSS .....50

Figura 20. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación. ....51

Figura 21. Resultados de acuerdo con las variables calculadas. ....51

Figura 22. Resultados del valor  $\eta$  en función de la temperatura del gas. ....52

Figura 23. Resultados del valor  $\eta$  en función de la presión del gas. ....52

Figura 24. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado. ....52

Figura 25. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.....53

Figura 26. El Valor de  $\eta$  en función de la presión 35 Bar.....54

Figura 27. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 900° y la presión a 35 bar.....	54
Figura 28. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación. ....	55
Figura 29. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.....	55
Figura 30. Resultados del valor $\eta$ en función de la temperatura del gas.....	55
Figura 31. Resultados del valor $\eta$ en función de la presión del gas. ....	56
Figura 32. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado. ....	56
Figura 33. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.....	57
Figura 34. El Valor de $\eta$ en función de la presión 35 Bar y la temperatura. ....	57
Figura 35. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 900° y 35 bar.....	58
Figura 36. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación. ....	59
Figura 37. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.....	59
Figura 38. Resultados del valor $\eta$ en función de la temperatura del gas.....	60
Figura 39. Resultados del valor $\eta$ en función de la presión del gas. ....	60
Figura 40. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado. ....	61
Figura 41. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.....	61
Figura 42. El Valor de $\eta$ en función de la presión 35 Bar y la temperatura. ....	62
Figura 43. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 1000° y 35 bar.....	62
Figura 44. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación.....	63
Figura 45. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.....	63
Figura 46. Resultados del valor $\eta$ en función de la temperatura del gas.....	64
Figura 47. Resultados del valor $\eta$ en función de la presión del gas.....	64
Figura 48. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado. ....	65
Figura 49. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.....	65
Figura 50. El Valor de $\eta$ en función de la presión 35 Bar y la temperatura. ....	66
Figura 51. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 1100° y 35 bar.....	66
Figura 55. Scratch Tester RST3.....	71
Figura 56. Esquema de las secciones en Modo Pre- escáner, Scratch y Post-escáner. (US Patente 6,520,004 B1).....	72





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Efecto de los parámetros de proceso de Rociado Térmico en Frío con respecto a la Velocidad de partícula ( $V_p$ ), Temperatura de la partícula ( $T_p$ ) Temperatura del sustrato ( $T_{sub}$ ) y la Velocidad Crítica ( $V_{cr}$ ) [17]. .....	16
Tabla 3.2. Las propiedades del Material Inconel 625 acorde a su hoja de información técnica del proveedor del polvo y tal como se encuentra dentro del software KSS. ....	48
Tabla 3.3. Propiedades del polvo Inconel 625 de acuerdo con las hojas de información técnica del proveedor del polvo y verificada a través de un análisis de distribución de tamaño. ....	49
Tabla.3.4. Modelos de trabajo que se utilizaron en la simulación con el software KSS. ....	49
Tabla 4.4. Diseño de Pruebas para la validación del Rociado Térmico en Frío. ....	68
Tabla 5.1. Pruebas definidas para los ensayos de rasgado lineales con cargas progresivas .....	71

## ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

### ABREVIACIONES

AM: Manufactura Aditiva (Additive Manufacturing)

ASI: Inestabilidad Adiabática (Adiabatic shear instability)

ASTM: Estándares Americanos de Pruebas de Materiales (American Standard Test of Materials)

DE: Eficiencia de Depósito (Deposition efficiency)

GGT: Global Goal Tree (Arbol de Objetivos Globales)

HPCS: Rociado en Frío a Alta Presión (Cold Spray High Pressure)

PSD: Distribución de Tamaños de Partículas (Particle Size Distribution)

SEM: Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning Electron Microscopy)

### SÍMBOLOS

$C_p$ : heat capacity of particle,  $J\ kg^{-1}\ C^{-1}$

d: nozzle diameter, m  
dp: particle diameter, m  
f: powder feed rate, kg s<sup>-1</sup>  
F\*: force to compress particle to height of dp/2, N  
L: nozzle length (supersonic part), m  
Lpre: prechamber length, m  
Pgas: process gas stagnation pressure, Pa  
r: nozzle expansion ratio, 1  
s: standoff distance, m  
t: time, s  
T: temperature, C  
Tgas: process gas stagnation temperature, C  
Tm: melting temperature, C  
Tmin: minimum temperature, C  
Tmax: maximum temperature, C  
Tp: particle temperature, C  
Tref: reference temperature, C  
Tsub: substrate temperature, C  
vc: velocity of contact point in explosive welding, m s<sup>-1</sup>  
vcr: critical particle impact velocity for bonding, m s<sup>-1</sup>  
vgun: traverse speed of gun, m s<sup>-1</sup>  
vp: particle impact velocity, m s<sup>-1</sup>  
 $\eta$ : normalised particle impact velocity ( $v_p/v_{cr}$ )

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

### 1.1.1. Cummins ReCon®

Cummins Inc. es una corporación estadounidense que se dedica al diseño, manufactura, distribución, construcción y prestación de servicios para motores diésel y sus temas relacionados, que incluyen los sistemas de combustible, controles, manejo y refrigeración comercial, filtración, control de emisiones y sistemas de generación de electricidad. Su sede principal se encuentra en las proximidades de Columbus, Indiana, en los Estados Unidos.

Cummins ofrece una línea completa de motores remanufacturados además de bloques de cilindro de medio rango y rango pesado, la línea de negocio es conocida como Cummins ReCon. Un motor ReCon suele ser la mejor opción cuando llega el momento de una reparación importante. Cuando un cliente tiene un motor desgastado y es necesario reemplazar varios componentes, considera la compra de un motor Cummins ReCon. Al comprar un motor ReCon, el motor Cummins desgastado generalmente tiene un valor específico y se toma en cuenta durante la compra del nuevo, todos los motores ReCon cuentan con las garantías de calidad siendo así una excelente opción para el comprador.

Cummins ReCon define las oportunidades de negocio para los Centros de Investigación y Tecnología en cinco tipos de beneficios:

1. Mantener el Mercado
2. Reducción en los costos utilizados en el Material para la Remanufactura (MUV)
3. Reducción en el costo de partes o componentes nuevos
4. Nuevos Negocios
5. Garantías

Las oportunidades de negocio están representadas en los objetivos de sus diferentes Centros de Investigación y Desarrollo en donde se clasificarán de acuerdo al beneficio y proceso clave correspondiente.

Para esta investigación, se describe brevemente la estructura de un tipo de proyecto administrado por el proceso clave Desarrollo de Tecnología, el cual, se encuentra ubicado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en San Luis Potosí y es el responsable de llevar a cabo las investigaciones correspondientes al Desarrollo e Integración de nuevas tecnologías.

Para considerar la correcta integración de una tecnología, se desarrollan proyectos llamados PPT (Tecnología que Precede al Producto) y el objetivo principal del PPT es contar con un desarrollo disciplinado y la integración de tecnologías capaces y robustas para el uso de equipos y plataformas que permitan soportar las investigaciones o métodos de reparación propuestos para los componentes ReCon.

Los proyectos PPT se encuentran divididos en 4 etapas:

1. Etapa 1.- Descripción y selección de la tecnología incluyendo posibles aplicaciones.
2. Etapa 2.- Definición de pruebas
3. Etapa 3.- Validación de pruebas incluyendo resultados
4. Etapa 4.- Especificación del proceso tecnológico y plan de transferencia

El principal interés en desarrollar la presente investigación es soportar tres de los entregables de las etapas 1 y 2 y serán listados a continuación.

**Etapa 1:**

1. Definir el plan para las pruebas del concepto inicial incluyendo las opciones del sistema y del proveedor y qué datos estarán disponibles para la selección del sistema.
2. Identificar el equipo del proyecto y los proveedores se planea involucrar

**Etapa 2:**

- Resultados actuales de las pruebas de evaluación del concepto en el contexto del plan identificado en la Etapa 1.

Las actividades previamente mencionadas, representan los objetivos específicos 1 y 2. Desarrollar procesos y metodologías de reparación o restauración de superficies a través de las tecnologías de Rociado Térmico en Frío utilizando la estructura de un PPT permite realizar propuestas sólidas con un proceso de investigación sustentado y orientar soluciones en los beneficios con reducción de costos en los materiales a ser utilizados para la reconstrucción de un componente que será utilizado en un motor ReCon.

Finalmente, los beneficios de usar un motor Cummins ReCon son evidentes. El adquirir un motor ReCon a un bajo costo, para el cliente significa: La reducción de tiempo de inactivo, el rendimiento mejorado y los costos operativos más bajos que vienen con la confiabilidad y durabilidad superiores de un motor ReCon lo convierten en un gran valor y hace que un motor Cummins ReCon sea aún más asequible en comparación con la reparación o reconstrucción.

### **1.1.2. Selección de materiales**

La selección de material es un paso en el proceso de diseño de cualquier objeto físico. En el contexto del diseño del producto, el objetivo principal de la selección del material es minimizar el costo mientras se cumplen los objetivos de desempeño del producto. La selección sistemática del mejor material para una aplicación dada comienza con las propiedades y los costos de los materiales candidatos. Por ello, seleccionar el material a utilizar en nuestro plan de pruebas es importante ya que debe contar con las propiedades mecánicas necesarias que demuestren su compatibilidad con el sustrato a reparar. El material seleccionado para realizar nuestro plan de pruebas será el Inconel 625 que cumple con las características requeridas, en comparativa con el hierro gris ASTM A48.

### **1.1.3. Inconel 625**

Las superaleaciones, o aleaciones de alta temperatura, son aleaciones que exhiben varias características clave: excelente resistencia mecánica, deformación térmica, buena estabilidad superficial y resistencia a la corrosión u oxidación [1]. Las tres clases principales de superaleaciones son las aleaciones a base de níquel, hierro y cobalto. Desde 1978, ASM ha estado suministrando superaleaciones de alta temperatura a las industrias aeroespacial y de procesamiento de productos químicos derivados del petróleo y por ello, la selección del Inconel 625 ha sido previamente definida por las características que posee este material y por su alta compatibilidad con sustratos base hierro gris ASTM A48 Clase 40.

Su capacidad para resistir un alto estrés y una amplia gama de temperaturas, tanto dentro como fuera del agua, así como ser capaz de resistir la corrosión mientras está expuesto a entornos altamente ácidos, lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones nucleares, automotriz y marinas [1].

Debido a los altos niveles de Niobio (Nb) del metal, así como a su exposición a ambientes hostiles y altas temperaturas, existía preocupación sobre la soldabilidad de Inconel 625, sin embargo, diferentes fuentes encuentran al Inconel 625 una opción ideal para utilizarse en procesos de soldadura con materiales como el hierro gris o rociar térmicamente sobre las superficies de hierro gris y aceros al carbono [2].

### **1.1.4. Rociado Térmico en Frío a Alta Presión - HPCS**

El Rociado en Frío es un proceso de recubrimiento en estado sólido, donde partículas de material en polvo son aceleradas contra un sustrato produciendo el depósito del material se produce por impacto a alta velocidad, alta deformación y adherencia de micropartículas [3]. Al igual que la soldadura explosiva, la deformación en el Rociado en Frío está asociada con la inestabilidad del corte transversal adiabático (ASI) y una gran deformación plástica en el área de contacto [4-7].

La velocidad mínima de impacto de partículas requeridas para crear la adherencia es denominada como la velocidad crítica de adherencia de adherencia y se representa con el símbolo griego Eta ( $\eta$ ) y depende de varios factores, como lo son, el tamaño de la partícula, la masa del material, la velocidad a la que es proyectada la partícula, entre otros. Sin embargo, esta variable es monitoreada a través de los resultados obtenidos una vez que las aplicaciones y definiciones de variables en el proceso queden establecidas.

Se define de manera análoga la estructura de nuestras variables, tal como se menciona a través de los estándares más reconocidos, como ASME y AWS, contando con variables críticas esenciales y variables no esenciales en el proceso, así como variables suplementarias.

Las variables críticas esenciales definidas son aquellas de mayor importancia como: la temperatura, la presión del gas  $N_2$ , la rugosidad de la superficie y las propiedades termo-mecánicas del sustrato ASTM A48 Clase 40 y el Inconel 625.

Las variables no esenciales para este desarrollo serán, la distancia de rociado y la velocidad de la trayectoria en la que se realiza el depósito.

Finalmente, las variables suplementarias están definidas por la dirección de disparo de las partículas depositadas en las multicapas obtenidas a partir la aplicación.

Se ha demostrado que las propiedades principales del recubrimiento son una función única de la relación de la velocidad de las partículas con la velocidad crítica, aquí denominada  $\eta$  [8]. Diversos estudios previos han tenido como objetivo comprender el mecanismo de adherencia, evaluar la velocidad crítica y, por tanto,  $\eta$ , para diferentes materiales y condiciones de proceso [6, 8-14]. Hasta ahora, ninguna de las fórmulas sugeridas para la velocidad crítica en  $\eta$  incorporan sustrato propiedades. Sin embargo, la tecnología sigue avanzando en desarrollos que permiten modelar las propiedades de deformación de la partícula durante su vuelo y también la modelación hasta llegar a la superficie de interés, así como la influencia de los parámetros de proceso tales como la presión del gas, velocidad de alimentación de la partícula, entre otros.

Para conocer las condiciones de proceso ideales en HPCS y sus efectos se presentarán las simulaciones realizadas con el Software KSS. El software KSS, será la herramienta que permita definir el número de pruebas en las regiones de interés basadas en las variables críticas, donde se busca explorar la zona que presenta la mayor eficiencia ideal en la resistencia a la adhesión y las condiciones de presión de gas y temperatura relacionadas en ese punto.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Los recubrimientos por Rociados Térmicos en Frío a Alta Presión son una opción viable para realizar reparaciones en superficies dañadas de componentes de un motor de combustión interna, sin embargo, al día de hoy no se cuenta con información particular acerca del desempeño de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión sobre superficies de hierro gris ASTM A48 con recubrimientos en Inconel 625, por lo cual, el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Cummins en San Luis Potosí se encuentra interesado en desarrollar la metodología para obtener dicha información que servirá para determinar bajo qué condiciones óptimas debe desarrollarse un recubrimiento así como el máximo desempeño obtenido.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La innovación técnica utilizando tecnologías de rociado térmico, se traduce como la transformación de una idea en un pieza o producto a reparar para mejorar sus condiciones actuales mediante la aplicación de un recubrimiento recuperando así sus dimensiones originales y extendiendo su tiempo de vida útil.

En Cummins, la innovación se integra como parte de la estrategia global y uno de los pilares del Centro de Investigación y Tecnología, que tiene como misión, evaluar las tecnologías adecuadas para la reparación de superficies de componentes de combustión interna. La definición del alcance y beneficios de cada tecnología para su implementación en la reparación de componentes es fundamental para cumplir con las especificaciones originales. Así mismo, remanufacturar



componentes representa un beneficio económico para la empresa, al sustituir un componente reparado que cuenta con un desempeño igual o superior a las características de diseño original, pero con un menor costo.

El desarrollo de las aplicaciones definidas para la estandarización de un proceso permite realizar recubrimientos adecuados en componentes de motor de forma confiable. Así mismo, se puede desarrollar procesos similares tomando en cuenta que presentan similitudes de superficie. Finalmente, cada nuevo desarrollo o líneas de investigación robustece el conocimiento científico y práctico dando oportunidad a mostrar aportaciones en innovación tecnológica y desarrollos sustentables.

Así, el entendimiento claro del alcance de la tecnología de Rociado Térmico en Frío, sus ventajas y su restricción establece un precedente durante los análisis de factibilidad técnica y económica en un componente de motor de combustión interna en los cuales Cummins presente un interés y que se encuentre con similitud en condiciones de superficie y composición química del sustrato.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Estudiar el proceso de Rociado Térmico en Frío de Alta Presión (HPCS) para el depósito de recubrimientos de Inconel 625 sobre un sustrato plano de hierro gris ASTM A48 clase 40 empleando simulación y validación experimental del proceso a fin de discernir sobre la utilidad de la simulación en función de la calidad de los recubrimientos obtenidos.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Conocer la eficiencia del depósito teórico mediante la simulación del proceso HPCS utilizando el software KSS en el Inconel 625 para un rango específico de temperatura y presión.

- Determinar la aproximación y similitud entre los resultados obtenidos en la simulación y los resultados de las pruebas mecánicas, caracterización del polvo y microestructural obtenidos del proceso de Rociado Térmico en Frío
- Probar el desempeño del recubrimiento obtenido utilizando pruebas de desgaste de acuerdo con lo establecido en el estándar ASTM G171.

## **1.5. HIPÓTESIS**

Es posible desarrollar experimentalmente recubrimientos por Rociado Térmico en Frío a Alta Presión simulados previamente en el Software KSS, considerando Inconel 625 como material de aporte sobre un sustrato de hierro gris ASTM A48 clase 40, donde la eficiencia en el proceso experimental presente una aproximación inferior al 20% de lo establecido en los resultados teóricos para el área obtenida del recubrimiento a 1 mm de espesor programado y simulado.

Los datos provenientes del proceso operativo experimental robustecerán las conclusiones que tienen como propósito, establecer un alto índice de confiabilidad en utilizar la herramienta de simulación previo a la operación, evitando así, generar el desarrollo de experimentos que generan un extra-costo para el proceso.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS

Los recubrimientos pueden considerarse soluciones de ingeniería para mejorar las superficies contra el desgaste, la corrosión, la degradación térmica y otros fenómenos de la superficie [15]. Los recubrimientos con utilidad en diferentes campos de la Ingeniería generalmente se caracterizan por una buena adhesión, compatibilidad con el sustrato y baja porosidad. Para que un recubrimiento cuente con las características antes mencionadas es fundamental tener en cuenta ciertos aspectos fisicoquímicos que disminuyan la aparición de defectos en los mismos, v.g., es importante que el material empleado como recubrimiento cuente con un coeficiente de expansión térmica similar al del material empleado como sustrato. La compatibilidad química y preparación superficial previa son también de gran importancia.

El principio de funcionamiento en general de los procesos de proyección térmica se ilustra en la Fig. 1, que muestra partículas que impactan en una superficie preparada y construyen una estructura laminar que va formando el recubrimiento, estas estructuras son características de los procesos de rociado térmico [16]. La Fig. 1 es una representación esquemática de un proceso de Rociado Térmico que utiliza polvo y destaca las principales características del proceso que afectan la calidad del recubrimiento. El proceso puede verse como un tratamiento térmico de alta velocidad (donde el tiempo, la temperatura y la masa del polvo metálico juegan un papel importante) en el que el objetivo es llevar la partícula del polvo a la temperatura deseada durante un período de tiempo determinado.

El tiempo que pasa una partícula en el proceso de Rociado se denomina tiempo de permanencia; se rige por la velocidad del gas y las características de las partículas de polvo. La velocidad del gas, a su vez, está determinada por el flujo total de gas a través de la boquilla, las características del gas y la energía que actúa sobre el proceso o resulta de él. La velocidad de las partículas es entonces una función de la velocidad del rociado junto con las características de las partículas, es decir, el tamaño, la morfología y la masa [16]. Por tanto, la

temperatura de una partícula determinada es función de la entalpía, la velocidad, la trayectoria y sus propias propiedades físicas y térmicas.

Las temperaturas del gas en la corriente del Rociado Térmico varían mucho en función del proceso. En resumen, la temperatura final, la velocidad y las interacciones ambientales de la distribución de partículas están relacionadas con la velocidad particular del Rociado Térmico, la temperatura y el tiempo de permanencia de las partículas resultantes, todo lo cual determina la microestructura y las propiedades del recubrimiento resultante [16].

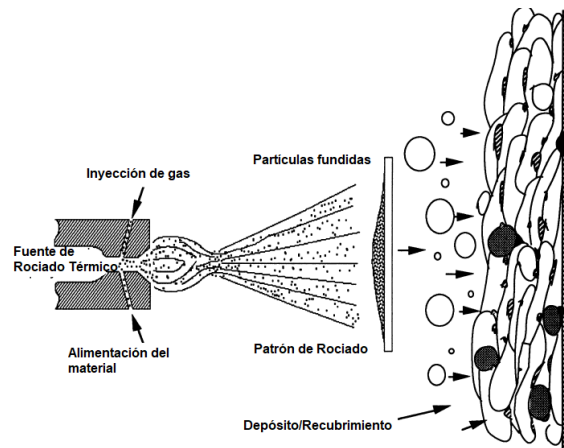


Figura 1. Proceso de Rociado Térmico y recubrimientos

Los avances en recubrimientos y los materiales de los procesos de Rociado Térmico, junto con los avances en el control del proceso, la instrumentación y la automatización, permiten tener aplicaciones de producción de alto volumen [15]. Las aplicaciones avanzadas continúan surgiendo a medida que se desarrollan avances en técnicas de proceso, materiales y controles y el Rociado Térmico en Frío se integra dentro de la familia de los Rociados Térmicos como una tecnología diferente al resto de los Rociados Térmicos que se detalla en este capítulo.

### **2.1.1. Introducción al Rociado Térmico en Frío**

El Rociado Térmico en Frío es un proceso de proyección térmica que permite la fabricación de recubrimientos empleando una amplia gama de metales y algunos otros materiales en estado sólido a temperaturas muy por debajo de sus puntos de fusión [17]

Es justo decir que el Rociado en Frío es una tecnología revolucionaria. Antes del Rociado en Frío, para depositar recubrimientos metálicos era necesario disolver los metales en un baño químico (enchapado), fundirlos (recubrimientos por rociado térmico convencional) o vaporizarlos (depósito de vapor). Ahora, en las condiciones adecuadas, los metales se pueden depositar rápidamente en estado sólido y, por lo tanto, se evitan cambios indeseables en la composición química o de fases comúnmente asociados con las otras tecnologías de recubrimientos que acabamos de enumerar.

Hay dos categorías principales de tecnologías de proceso de Rociado Térmico en Frío, comúnmente conocido como Rociado en Frío de Alta Presión (HPCS) y Rociado en Frío de Baja Presión (LPCS). El proceso LPCS no se trata en esta tesis, pero sus diferencias con HPCS se explican brevemente más adelante en este capítulo [17].

En el proceso HPCS como lo muestra la figura 2, partículas sólidas en el rango de 5 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro se aceleran en un flujo de gas caliente a velocidades supersónicas, típicamente del orden de 300 a 1200 m / s (1000 a 4000 ft/s) y luego rociado sobre una superficie de sustrato duro; por ejemplo, un metal, cerámica o vidrio.

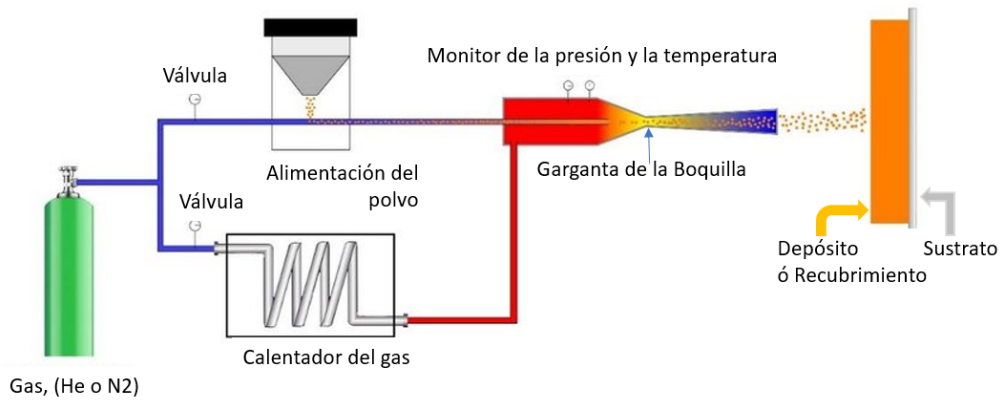


Figura 2. Diagrama del flujo de proceso de Rociado Térmico. El proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión utiliza un calentador de gas de alta presión y un alimentador de polvo de alta presión para inyectar el polvo de metálico hacia la garganta de la boquilla. Esto proporciona velocidades muy altas que permiten que este proceso deposite una amplia gama de metales y algunos otros materiales [17].

Si la velocidad es lo suficientemente alta y la combinación de materiales es adecuada para el proceso, al impactar las partículas con la superficie del sustrato se someten a un calentamiento adiabático y se deforman plásticamente a velocidades de cizallamiento muy altas, lo que hace que se aplanen y se adhieran a la superficie subyacente (Figura 2 y Figura 3). Este mecanismo de unión es muy similar a la inestabilidad de cizallamiento o corte transversal adiabático que se encuentra en la soldadura explosiva; pero, en este caso, ocurre a microescala [17].

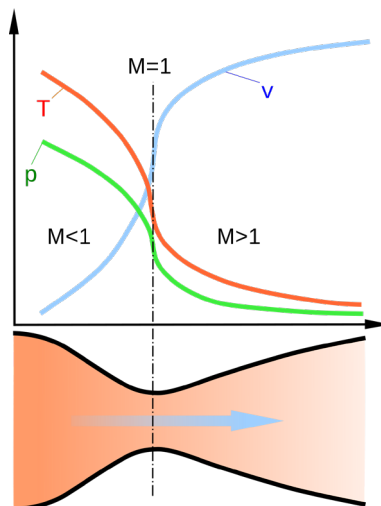


Figura 3. Diagrama esquemático que ilustra los cambios en la velocidad, temperatura y presión del gas que fluye a través de una boquilla convergente-divergente (de Laval). Si la disminución de la presión a través de la garganta estrecha de la boquilla está por encima de un mínimo crítico, la velocidad del flujo en la sección divergente de la boquilla se vuelve supersónica ( $Mach > 1$ ) y la temperatura del gas cae a medida que aumenta la velocidad del flujo [17].

El gas de proceso (ya sea Nitrógeno ( $N_2$ ) o Helio ( $He$ )) se calienta inicialmente para aumentar la velocidad de flujo del gas en la boquilla de rociado y así aumentar las velocidades de las partículas de rociado.

Aunque el gas puede comenzar a temperaturas moderadamente altas, se enfría muy rápidamente a medida que se expande en la sección divergente larga de la boquilla de la pistola de Rociado Térmico en Frío y, por lo tanto, las temperaturas de las partículas de Rociado Térmico en Frío permanecen muy por debajo del punto de fusión. Por lo tanto, en comparación con los Rociados Térmicos convencionales, donde las partículas se funden o casi se funden durante el proceso de depósito, esta es una tecnología de proceso a temperatura comparativamente baja, de ahí el nombre de Rociado en Frío [17].

Si la velocidad del impacto es demasiado baja, las partículas simplemente rebotarán y desgastarán la superficie, o posiblemente algunas partículas se incrusten físicamente en la superficie, pero sin deformar sustancialmente la superficie o adherirse firmemente a ella. En los Rociados Térmicos en Frío, la velocidad de impacto mínima necesaria para alcanzar la inestabilidad de un corte transversal o cizallamiento hidrodinámico se denomina **velocidad crítica ( $V_{cr}$ )**. La velocidad crítica es un concepto que solo es válido para materiales metálicos como es el caso de esta tesis. La eficiencia de depósito (es decir, la masa de material realmente depositado en comparación con la masa de material rociado sobre la superficie) aumenta dramáticamente a medida que la velocidad promedio de las partículas se mueve más allá de  $V_{cr}$ , hasta cierto límite denominado límite de erosión a partir de cual las partículas ya no se depositan, sino que empiezan a deteriorar la superficie del sustrato. Es decir, hay una ventana o rango de velocidades óptimo para cada tipo de material metálico. La velocidad crítica varía significativamente dependiendo del material y otros factores, como la temperatura de las partículas de rociado, la temperatura del sustrato y el tamaño de las partículas que también pueden influir en esta variable [17].

En HPCS, la aceleración del chorro de gas se crea pasando gas a alta presión, típicamente en el rango de 1 a 5 MPa (145 a 725 psi), a través de una boquilla convergente-divergente (boquilla de Laval) para lograr un flujo supersónico.

El diagrama de la figura 3 ilustra los cambios en la presión del gas, la velocidad del flujo y la temperatura en una boquilla convergente-divergente. La región de pequeño diámetro de la boquilla que separa las secciones convergentes y divergentes, a menudo llamada garganta de la boquilla es un elemento crítico de la geometría de la boquilla.

Si la caída de presión desde el extremo a contracorriente de la garganta de la boquilla hasta su extremo con la corriente está en o por encima de un mínimo crítico, el gas en esa región fluirá exactamente a la velocidad local del sonido, es decir, flujo sónico o Mach 1 [17].

A medida que el gas se expande en la subsecuente sección divergente de la boquilla, la densidad del gas disminuye y se enfría y acelera a una velocidad supersónica. Para lograr las velocidades más altas de las partículas, las partículas sólidas se inyectan antes del cuello de la boquilla (véase la Fig. 1), pasando a través de las secciones sónica y supersónica de la boquilla. En la figura 4 se muestra un diagrama de una boquilla HPCS y las velocidades calculadas de gas y partículas de Aluminio y Cobre.

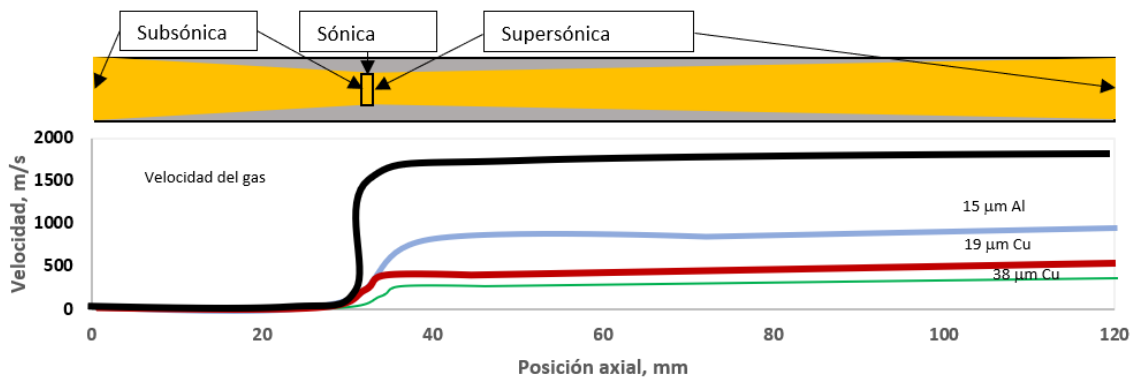


Figura 4. Representación esquemática de la velocidad del gas y las partículas en zona de convergencia (subsónica), zona garganta (sónica) y zona divergente (supersónica) de una boquilla de HPCS [17].



En la medida en la que se suministra el gas precalentado del proceso de Rociado Térmico a Alta Presión dentro del sistema se incrementa la velocidad sónica en la garganta de la boquilla y las velocidades más altas de la partícula son alcanzadas gracias al precalentamiento del gas. Se desarrollaron sistemas que utilizaban gas nitrógeno que son menos costosos y con mayor disponibilidad para precalentar el gas y aumentar las velocidades de las partículas. Hoy en día, las temperaturas del gas en dichos sistemas pueden oscilar hasta 1100 ° C (2010 ° F o 1373 K). A pesar de que los sistemas alcanzan temperaturas relativamente altas, el gas se enfría significativamente cuando se expande en la región divergente de la boquilla. Por lo tanto, las partículas en este proceso son expuestas a altas temperaturas únicamente por un periodo de tiempo corto y permanecen muy por debajo de su punto de fusión.

### **2.1.2. Modelado y Simulación del Proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión**

Un concepto fundamental para el Rociado Térmico en Frío de los materiales metálicos es que el depósito toma lugar si la velocidad de la partícula ( $V_p$ ) tras el impacto se vuelve mayor que la velocidad crítica,  $V_{cr}$  (véase la Tabla 2.1), pero algunas de las suposiciones no involucran todas las condiciones del proceso, las cuales podrían presentar un efecto negativo sobre el recubrimiento deseado. Por ejemplo, la calidad de los recubrimientos de Rociado Térmico en Frío depende de la relación de  $V_p$  hacia  $V_{cr}$ ; por ende, la resistencia a la tensión del recubrimiento del Rociado en Frío se incrementa linealmente al aumentar  $\eta = V_p / V_{cr}$ .

Demostrar y pronosticar que un Rociado Térmico en Frío sea exitoso y optimizado como se menciona en la suposición anterior puede ser viable si se lleva a través de la aplicación del modelado y la simulación en la investigación del Rociado en Frío considerando el efecto de los parámetros de proceso y del material tanto en la velocidad de la partícula  $V_p$  como en la velocidad crítica  $V_{cr}$  como se lista en la Tabla 2.1 [17].

Tabla 2.1. Efecto de los parámetros de proceso de Rociado Térmico en Frío con respecto a la Velocidad de partícula ( $V_p$ ), Temperatura de la partícula ( $T_p$ ) Temperatura del sustrato ( $T_{sub}$ ) y la Velocidad Crítica ( $V_{cr}$ ) [17].

Factor	Parameter	Effect on $v_p$	Effect on $T_p$	Effect on $T_{sub}$	Effect on $v_{cr}$
Gas	Type	$v_p(\text{He}) > v_p(\text{N}_2)$	$T_p(\text{He}) < T_p(\text{N}_2)$		
	$T_{gas}$	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow$	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$	$T_{gas} \uparrow \Rightarrow T_{sub} \uparrow$	
	$P_{gas}$	$P_{gas} \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow$	$P_{gas} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow \downarrow$		
Nozzle	Length, $l$	$l \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow$	$l \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$l \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	
	Exp. ratio, $r$	$r \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow$	$r \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$r \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	
	Diameter, $d$	$d \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow$			
Prechamber	Length, $l_{pre}$		$l_{pre} \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$		
Procedure	Standoff distance, $s$	$s \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	
	Spraying angle, $w$	$w \uparrow \Rightarrow v_p \downarrow$			
	Traverse speed, $v_{gun}$			$v_{gun} \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	
	Powder feed-rate, $f$	$f \uparrow \Rightarrow v_p \downarrow$	$f \uparrow \Rightarrow T_p \uparrow$	$f \uparrow \Rightarrow T_{sub} \uparrow$	
Feedstock material	Strength, $\sigma$				$\sigma \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow$
	Density, $\rho$	$\rho \uparrow \Rightarrow v_p \downarrow$	$\rho \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$		$\rho \uparrow \Rightarrow v_{cr} \downarrow$
	Melting Temp., $T_m$				$T_m \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow$
	Heat capacity, $c_p$		$c_p \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$		$c_p \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow$
Substrate material	Conductivity, $\kappa$			$\kappa \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	$\kappa \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow ?$
	Heat capacity, $c_p$			$c_p \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	$c_p \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow ?$
	Effusivity, $e$			$e \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	$e \uparrow \Rightarrow v_{cr} \uparrow ?$
Powder	Substrate temperature, $T_{sub}$	$d_p \uparrow \Rightarrow v_p \uparrow \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_p \downarrow$	$s \uparrow \Rightarrow T_{sub} \downarrow$	$T_{sub} \uparrow \Rightarrow v_{cr} \downarrow ?$
	Particle size, $d_p$	$w \uparrow \Rightarrow v_p \downarrow$			$d_p \uparrow \Rightarrow v_{cr} \downarrow$
	Particle temperature, $T_p$				$T_p \uparrow \Rightarrow v_{cr} \downarrow$
	Particle morphology				Not defined

Para esta tesis, se asume que:

- La velocidad crítica **Vcr** es concebida como una característica del polvo que depende principalmente de las propiedades del material. Por ejemplo, la  $V_{cr}$  dependerá del tipo de material que se desea utilizar como recubrimiento, si el material es muy denso la Velocidad crítica será mucho menor (véase la Ec. 3) [17]
- La velocidad y temperatura de las partículas, **Vp y Tp**, se consideran como condiciones de impacto que dependen principalmente de los parámetros

del proceso, como la temperatura del gas, la presión del gas y las dimensiones de la boquilla. Entre mayor sea la Temperatura del gas y la Presión del gas utilizada en el proceso de Rociado, mayor será la Temperatura y Velocidad de la partícula.

- Existe una influencia de la temperatura de las partículas  $T_p$  en la velocidad crítica  $V_{cr}$ , que hace que la calidad del recubrimiento varíe cuando se cambian los parámetros del proceso. Por ejemplo, cuando la temperatura de la partícula se incrementa la deformación viscoplástica también se incrementa porque es dependiente de la tasa de deformación. La dependencia que existe entre la deformación de un material y la temperatura de la partícula en estos modelos de materiales se basa en la consideración de la mecánica de dislocación activada térmicamente, que generalmente se manifiesta como ablandamiento térmico, sin considerar cambios microestructurales y que juegan un rol clave en el acomodo de las partículas durante el proceso de rociado térmico [17].

Estas complejas dependencias plantean un desafiante problema de optimización. El modelado y la simulación del Rociado en Frío están especialmente dirigidos a este problema y están destinados a proporcionar un medio para comprender y expresar explícitamente estas dependencias.

Las actividades de modelado y simulación en el campo del Rociado en Frío se pueden dividir en dos partes principales:

- Mecánica de sólidos: principalmente para estudiar la deformación y la unión de las partículas durante el impacto.
- Dinámica de fluidos: principalmente para calcular la velocidad y la temperatura de las partículas. Existen actividades de modelado adicionales que son relevantes para la investigación de la Rociado en Frío pero que están dirigidas a problemas diferentes de los objetivos antes mencionados [17].

### **2.1.3. Modelado y simulación del impacto de partículas**

Se entiende que la unión y el depósito de un Rociado en Frío están estrechamente relacionadas con los fenómenos termo-mecánicos pertenecientes al impacto de partículas a alta velocidad. No obstante, el estudio experimental directo de estos fenómenos es difícil, si no imposible, debido a las pequeñas escalas de tiempo y longitud asociadas: nanosegundos y micrómetros, respectivamente. La naturaleza dinámica y estocástica del impacto de las partículas durante el Rociado en Frío también hace que sea casi imposible realizar observaciones experimentales in situ. Por esta razón, el modelado y el análisis numérico del impacto de partículas se han utilizado para complementar los estudios experimentales en la investigación del Rociado Térmico en Frío [17].

#### **2.1.3.1. Objetivos del modelado y mecanismo de unión a nivel microestructural**

El principal objetivo del modelado del impacto de partículas es investigar el proceso de deformación y los fenómenos relacionados durante el impacto, que conducen a la unión y depósito de las partículas.

Una pregunta general se refiere al mecanismo de unión a nivel microestructural: ¿En qué condiciones y en qué medida se producirá la unión metalúrgica entre un sustrato y una partícula que choca? Esta pregunta se persigue principalmente para permitir la predicción de las condiciones que conducen a un depósito exitoso por Rociado en Frío para diferentes combinaciones de materiales y parámetros de proceso. Existen preguntas más específicas en el estudio del impacto de partículas que se refieren a los siguientes temas [17]:

- Deformación general de partículas como resultado de impactos iniciales y secundarios; aspectos morfológicos de la unión y depósito de partículas

- Localización de deformaciones e inestabilidad a cortante; desarrollo de variables de campo mecánicas y de temperatura en la interfaz de partícula y sustrato; mecanismos de unión
- Estimación de la velocidad crítica de unión (y / o erosión) para un conjunto dado de parámetros de material, tamaño de partícula y temperatura de impacto de partícula.
- Estado mecánico del depósito, por ejemplo, en relación con tensiones residuales; transformación de fase y cambios microestructurales

Estas preguntas se tratan normalmente en el marco de un estudio de parámetros, por ejemplo, para investigar el efecto de diversas propiedades de los materiales y parámetros del proceso en la eficiencia del depósito y en las propiedades finales de los depósitos Rociados en Frío [17].

### **2.1.3.2. Fenómenos Físicos Subyacentes**

Hay varios fenómenos físicos que pueden influir durante el proceso de impacto y la unión de la partícula. De hecho, normalmente no se modela el proceso de unión de partículas; son más bien los procesos físicos relevantes relacionados con la unión de partículas los que se describen o ilustran mediante modelos matemáticos o simulación numérica. Estos fenómenos físicos y los modelos correspondientes se comentan a continuación.

#### **2.1.3.2.1. Modelos de deformaciones y materiales**

El proceso de deformación juega un papel clave en la acomodación de partículas en un depósito Rociado en Frío. Por lo tanto, casi todos los modelos de impacto y unión de partículas comienzan con el análisis de la deformación plástica de las partículas durante el impacto y la unión.

Esto a menudo se persigue a través de modelos de deformación de nivel continuo, que se han utilizado ampliamente en la investigación de la Rociado Térmico en Frío. Las propiedades plásticas constitutivas de los materiales involucrados son el principal insumo de estos modelos.

Para el caso de materiales metálicos, la deformación normalmente se considera visco-plástica, es decir, dependiente de la tasa de deformación y, por lo tanto, se describe como una relación entre la tensión de flujo en un lado y la deformación plástica, la tasa de deformación y la temperatura en el otro. lado. La dependencia de la temperatura de la tensión de flujo en estos modelos de materiales se basa en la consideración de la mecánica de dislocación activada térmicamente, que generalmente se manifiesta como ablandamiento térmico, sin considerar cambios microestructurales. Un ejemplo conocido y ampliamente utilizado de modelos que describen la respuesta visco-plástica de materiales a alta velocidad de deformación es el modelo de plasticidad de Johnson-Cook [17]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\sigma$  es la tensión de flujo.

$\varepsilon$  es la deformación plástica equivalente.

$\dot{\varepsilon}^*$  es la tasa de deformación plástica equivalente normalizada con respecto a una tasa de deformación de referencia.

$T^* = (T - T_{ref}) / (T_m - T_{ref})$ , en el que  $T_{ref}$  es la temperatura por encima de la cual se considera que se produce el ablandamiento térmico.

$T_m$  es la temperatura de fusión;

$A$ ,  $B$ ,  $n$  y  $m$  son constantes materiales.

La respuesta elástica de los materiales también juega un papel en el comportamiento de deformación de las partículas durante el impacto a alta

velocidad, aunque en menor medida que la respuesta visco-plástica. La elasticidad se vuelve aún más importante cuando el modelado del impacto de partículas incorpora el rebote de partículas. El comportamiento elástico se puede describir mediante la elasticidad lineal o mediante una ecuación de estado (EOS), es decir, la relación entre la presión y el volumen a una temperatura determinada. Este último es más apropiado para los casos de velocidades de impacto relativamente altas. Ejemplos de EOS para materiales sólidos incluyen la ecuación de estado lineal de Mie-Grüneisen [17]

$$p - p_H = \rho\Gamma(E_m - E_H) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde  $p_H$  y  $E_H$  son la presión de Hugoniot y la energía específica, respectivamente, y  $G$  es la relación de Grüneisen. En el modelado del impacto de partículas, EOS se usa normalmente junto con el módulo de corte elástico.

#### **2.1.3.2.2. Disipación de energía y transferencia de calor**

La energía cinética de una partícula que choca se consume, en gran medida, como el trabajo requerido para la deformación plástica, que finalmente se disipa en forma de calor. Una fracción más pequeña de esta energía, considerada aproximadamente el 10% o menos, se almacena dentro del material como energía interna no térmica, como resultado de tensiones residuales (elásticas) de largo alcance o de defectos estructurales como dislocaciones o límites gemelos [17].

En el modelado de tasas de deformación altas, la generación de calor se asume que es adiabático debido a las escalas de tiempo muy pequeñas que se ven involucradas. En Rocidos Térmicos en Frío las partículas están en el rango de tamaño de un micrómetro, por lo que la escala de longitud también es pequeña [17].

### 2.1.3.2.3. La inestabilidad de corte adiabático

Generalmente se asocia con una deformación plástica con una alta tasa de deformación. Normalmente es una causa de falla de componentes metálicos sometidos a carga dinámica, que se manifiesta como formación de bandas de corte adiabático. La idea de la formación de bandas de corte puede explicarse en vista de la respuesta plástica de un material típico de endurecimiento por trabajo Figura 5. Como se mencionó, normalmente una gran fracción (aproximadamente el 90%) del trabajo plástico se disipa en calor. En condiciones de calentamiento adiabático, el calor generado permanece en la región deformada. Esto sucede normalmente cuando la deformación tiene lugar durante un período de tiempo muy corto, por lo que hay una transferencia de calor insignificante para conducir el calor generado lejos de la región deformada. Como resultado, habría un ablandamiento térmico con el progreso de la deformación, contrarrestando el endurecimiento por trabajo.

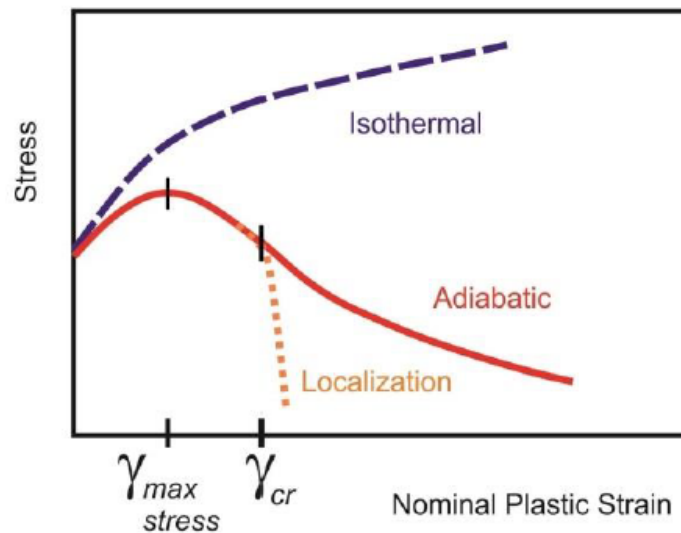


Figura 5. Variación Esfuerzo-Deformación para un material típico endurecido por trabajo durante un experimento de torsión. La Localización puede ocurrir durante un calentamiento adiabático en una zona de deformación suave, que es después de que el flujo de esfuerzos alcanzan el máximo [17].



#### **2.1.3.2.4. Fenómenos microestructurales**

La microestructura del material puede sufrir cambios durante el impacto. Estos cambios pueden influir no solo en la deformación y el comportamiento de unión, sino también en la propiedad final del depósito [17].

Por ejemplo, existe evidencia de recristalización dinámica y transformación de fase inducida por deformación en Rociado Térmico en Frío. En este caso, se esperaría que ocurriera un ablandamiento del material, además del resultante de la dinámica de dislocación activada térmicamente. Sin embargo, el efecto exacto de estos cambios en el comportamiento de deformación y unión aún no se ha estudiado cuantitativamente ni se ha incorporado al modelado del impacto de partículas.

Otro aspecto de los cambios microestructurales presuntamente relevantes es la generación de dislocaciones geoméricamente necesarias (GND) que se deben a gradientes de deformación. Estos GND dan lugar a un endurecimiento del material, además del resultante del endurecimiento por trabajo, por lo que se puede considerar que influyen en el comportamiento de deformación y unión [17].

#### **2.1.3.3. Métodos de modelado y simulación**

La mayoría de las técnicas de modelado utilizadas para el análisis del impacto de partículas de Rociado en Frío se han basado en la mecánica del continuo y, en particular, han implicado métodos de simulación numérica basados en mallas.

La atención se ha centrado en la simulación de elementos finitos del impacto de partículas en dos y tres dimensiones, utilizando formulaciones Lagrangianas, Eulerianas o combinadas. La aplicación de estos métodos en la investigación de la aspersión fría se resume como de la siguiente forma [17]:

- Método del Elemento Finito
- Métodos de Malla Libre
- Modelos Semi - empíricos y Analíticos

### **2.1.3.3.1. Resultado principal**

#### **2.1.3.3.1.1. Deformación de partículas y fenómenos interfaciales**

Muchas características importantes del impacto de partículas simuladas en el Rociado Térmico en Frío fueron mostradas por primera vez por Dykhuizen. Sus simulaciones mostraron el desarrollo de la forma de las partículas y las correspondientes variables de campo, como la temperatura, durante el impacto de las partículas de cobre como se puede observar en la figura 6 [17, 65].

Para comprender el Rociado Térmico en Frío a Alta Presión y lograr condiciones óptimas se necesitan los efectos de los parámetros del proceso y los diseños de las boquillas en las condiciones de impacto de partículas, el tipo de deformación y los fenómenos que se encuentran a su alrededor, se pueden emplear un modelo de dinámica de fluidos para determinar las temperaturas y velocidades de los gases y partículas [17, 65].

Los cálculos pueden describir las influencias de la geometría de la boquilla y todos los parámetros importantes del proceso, como el gas de proceso, la temperatura y la presión del gas, el tipo de material de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión y el tamaño de las partículas en las condiciones de impacto de las partículas [17, 65].

Típicamente, como primer enfoque, se utiliza un esquema de la Fig. 2 isentrópico, unidimensional del modelo de la técnica utilizada en el proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión para calcular el número de Mach, la velocidad del gas y todas las demás propiedades de estado para cada sección transversal de la boquilla [17, 65].

En un segundo paso, para dicho conjunto de velocidades y temperaturas de gas dadas, se puede calcular la aceleración de partículas y la transferencia de calor [17, 64].

Para los cálculos de transferencia de calor y la conductividad térmica del gas se aproxima mediante el polinomio de Eckert y Drake [17, 65].

La transferencia de calor a la partícula se describe mediante la ecuación de Ranz-Marschall [17, 64, 65, 66].

En condiciones de proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta presión típicas que utilizan partículas con diámetros de menos de 100  $\mu\text{m}$ , los números de Biot significativamente inferiores a 0,1 indican que el calentamiento de las partículas está dominado por la transferencia de calor a la partícula y no por la difusividad térmica dentro de la partícula [17, 65, 66].

Esto también demuestra que la distribución de temperatura sobre el radio de partículas se puede asumir como homogénea durante los cálculos de dinámica de fluidos y para las condiciones iniciales en los cálculos de impacto [17, 14, 65].

Estos cálculos de flujo unidimensionales solo pueden describir el flujo dinámico de gas dentro de la boquilla y solo pueden aproximar el flujo a lo largo del eje de una boquilla tridimensional real. La figura 6, muestra de forma esquemática como se pueden proporcionar más detalles de las condiciones de impacto de partículas empleando un código de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como FLUENT [17,65].

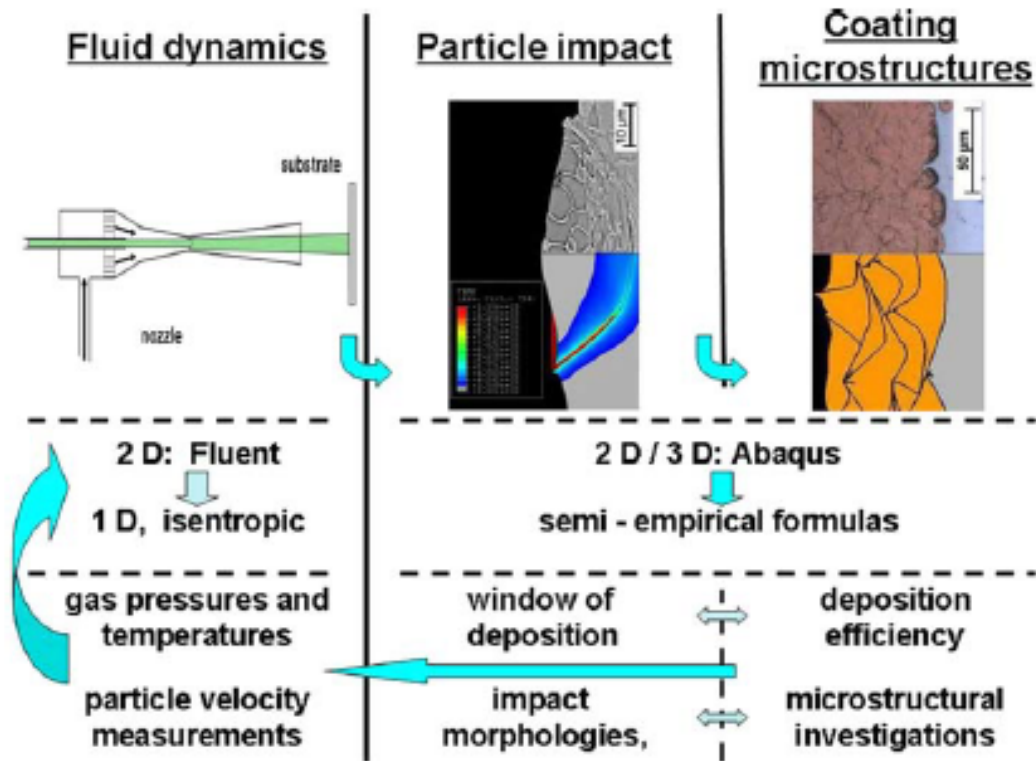


Figura 6. Concepto para la descripción completa del proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión mediante el modelado y verificación experimental posterior. El concepto describe un circuito cerrado desde las condiciones de impacto definidas por la dinámica de fluidos hasta las condiciones de unión y las propiedades de recubrimiento esperadas. La retroalimentación de las investigaciones experimentales se utiliza para mejorar las condiciones de impacto basadas en modelos. Las inserciones divididas muestran el impacto modelado del cobre sobre el acero en detalle, la formación prospectiva del recubrimiento y los detalles microestructurales. [17, 65].

### 2.1.3.3.1.2. Predicción de la velocidad crítica

La estimación teórica de la velocidad crítica requiere, ante todo, la postulación de un criterio de unión. En la soldadura explosiva, por ejemplo, la formación de un chorro en la interfaz se considera un criterio para una unión exitosa. La formación de chorros también es una característica común en el Rociado Térmico en Frío. Sin embargo, al modelar el impacto de las partículas, no existe una forma sencilla de determinar cuantitativamente el umbral de formación del chorro. Por otro lado, hay un cambio brusco en la tendencia de todas las variables de campo en ASI. Así, ASI puede tomarse como criterio de unión en una primera aproximación [17].

Con base en este criterio, la velocidad crítica se ha definido como la velocidad mínima requerida para inducir ASI (Figura 7). Por tanto, el valor de la velocidad crítica se puede calcular basándose en la simulación del impacto de las partículas. Sin embargo, cabe señalar que el valor calculado está influenciado por varios parámetros computacionales, como el tamaño de malla y los algoritmos de cálculo seleccionados. Estos parámetros deben ajustarse con respecto a los valores experimentales. A este respecto, las simulaciones de impacto deben verse como un medio para el estudio de parámetros. De esta manera, el efecto de varias propiedades del material sobre la velocidad crítica del cobre se resolvió como una relación lineal [17]:

$$v_{cr} = 667 - 14\rho + 0.08T_m + 0.1\sigma_u - 0.4T_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$\rho$ : es la densidad en g/cm<sup>3</sup>

$T_m$  es la temperatura de fusión en C

$\sigma_u$  es la resistencia última en MPa y

$T_i$  es la temperatura inicial de las partículas en C.

Esta fórmula está elaborada para pequeños cambios en las propiedades con respecto a las del cobre como material de referencia.

Posteriormente, Schmidt propusieron una fórmula más general para la velocidad crítica, que cubre una gama más amplia de parámetros del material [17, 61].

$$v_{cr} = \kappa_1 - \sqrt{c_p(T_m - T_p) + 16 \frac{\sigma}{\rho_p} \left( \frac{T_m - T_p}{T_m - 293} \right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$\kappa_1$  es un parámetro de ajuste adimensional que está en el rango de 0.5 a 0.6 para materiales metálicos.

La ecuación 4 es, de hecho, una función de ajuste, desarrollada sobre la base de un balance de energía entre la energía cinética de un lado y la suma de las energías potenciales térmicas y mecánicas del otro lado. Esta fórmula está diseñada para ajustarse a datos experimentales y de simulación y se basa en la suposición de que la resistencia última de la partícula disminuye linealmente al aumentar la temperatura [17].

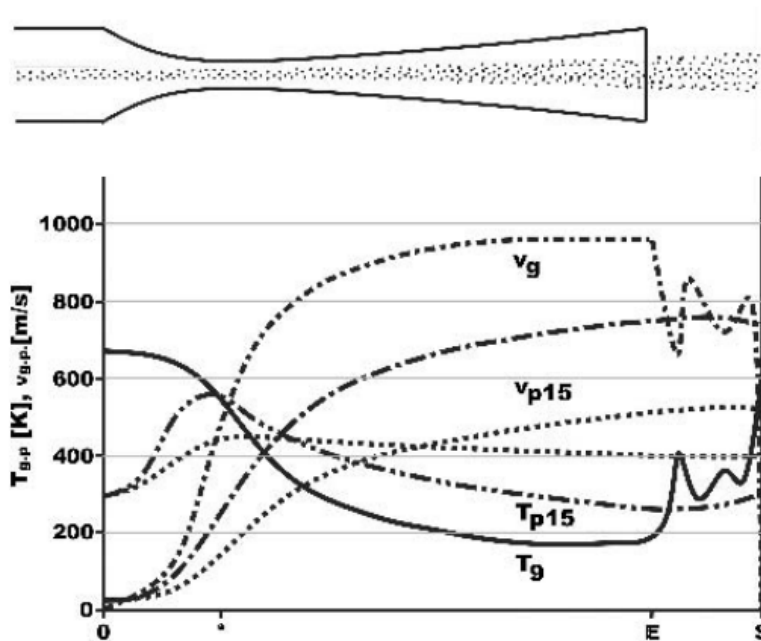


Figura 7. Desarrollo de Temperatura y Velocidad a lo largo del eje de la boquilla para nitrógeno como gas de proceso (g) y un tamaño de partículas de cobre (15),  $T_0 = 593$  K,  $p_0 = 2.5$  MPa. [17,62].

#### 2.1.3.4. Modelado integrado

Un resultado importante de las simulaciones de impacto es que proporcionan una base para la estimación de la velocidad crítica en función de varios parámetros de material y proceso.

Las simulaciones de dinámica de fluidos, por otro lado, proporcionan una base para el cálculo de las condiciones de impacto en función de estos parámetros. Por lo tanto, para optimizar el depósito por aspersion fría para un material dado, los

resultados de ambos tipos de modelado (impacto de partículas y flujo de fluido) deben integrarse y considerarse simultáneamente [17].

El concepto de modelado integrado se ilustra en la figura 10, que muestra variaciones de la velocidad de las partículas y la velocidad crítica con el tamaño de las partículas. Esta integración se logra superponiendo los resultados de la dinámica de fluidos y análisis de mecánica de sólidos, cuyos ejemplos también se muestran por separado en las figuras 8 y 9. La figura muestra que, para un material dado y un conjunto específico de parámetros, habrá un rango de tamaño óptimo en el que la velocidad de las partículas es significativamente más alta que la velocidad crítica. A ambos lados de este rango, no habría depósito o solo una unión imperfecta. La figura 10 demuestra que existe un rango óptimo de tamaño de partícula para cualquier conjunto dado de condiciones de proceso, y viceversa. También muestra el efecto de las especificaciones del sistema, a saber, la longitud de la precámara, sobre las características del depósito. [17].

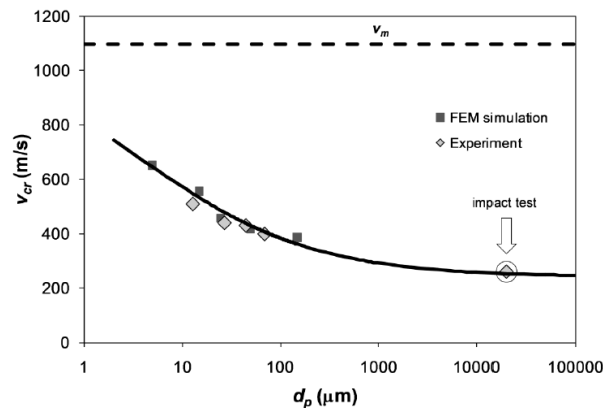


Figura 8. Variación de la velocidad de impacto crítica con el tamaño de partícula de cobre. Las líneas continuas corresponden al modelo analítico, mientras que las líneas punteadas muestran el límite superior de la velocidad crítica, correspondiente a la adiabaticidad cero. Se supone que la temperatura de la partícula en el momento del impacto es de 300 K. La prueba de impacto corresponde a experimentos con balas de 20 mm [17].

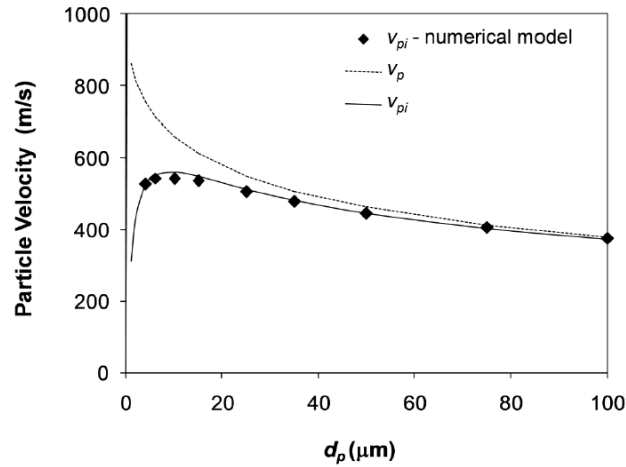


Figura 9. Variación de la velocidad de impacto de las partículas para partículas de cobre de diferentes tamaños (puntos de datos calculados numéricamente) en comparación con los valores obtenidos de las funciones de ajuste del número de Nusselt y la velocidad de la partícula [17].

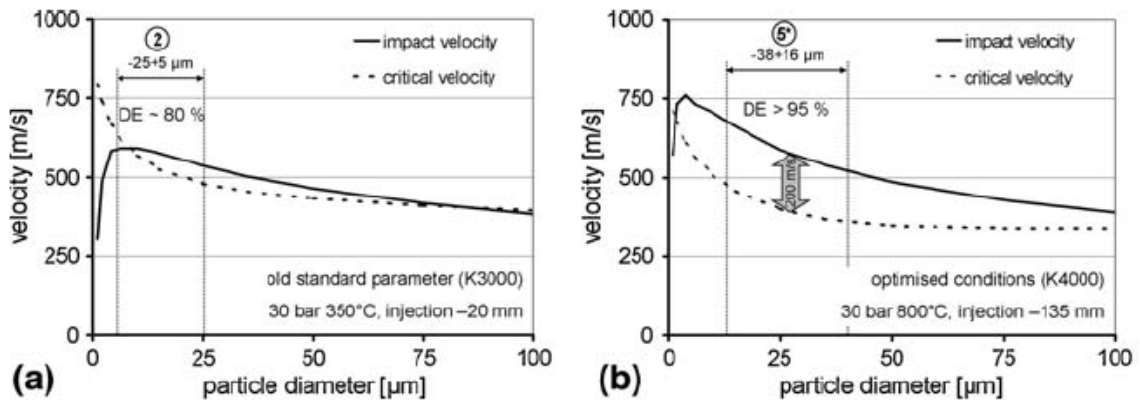


Figura 10. Gráfica del impacto y Velocidades Críticas en función del diámetro de partícula calculado para dos condiciones de proceso diferentes en el Rociado Térmico en Frío de cobre. Tenga en cuenta que los rangos típicos de tamaño de partículas y las eficiencias de depósito son diferentes para los dos casos. DE, (Eficiencia de depósito) [17]

De hecho, la Figura 10 muestra una ventana de parámetros que indica la viabilidad para la obtención de recubrimientos por Rociado Térmico en Frío a Alta Presión para un material en polvo específico bajo ciertas condiciones de proceso. Se puede ilustrar una ventana de depósito más conveniente en un diagrama en el que la velocidad de las partículas se representa frente a la temperatura de las partículas, como se muestra en la figura 11 para el Rociado Térmico en Frío de titanio. Los puntos de datos que se muestran en la figura corresponden a las



condiciones de impacto calculadas (utilizando modelos de dinámica de fluidos) para diferentes tamaños de partículas y diferentes temperaturas de gas. Las líneas corresponden a las velocidades críticas calculadas para la unión (azul) y la erosión (rojo), para un tamaño de partícula de 25  $\mu\text{m}$ . La velocidad crítica para la unión se calcula con base en la ecuación 4. La velocidad de erosión se calcula en base a una ecuación similar, pero con diferentes parámetros de ajuste [17].

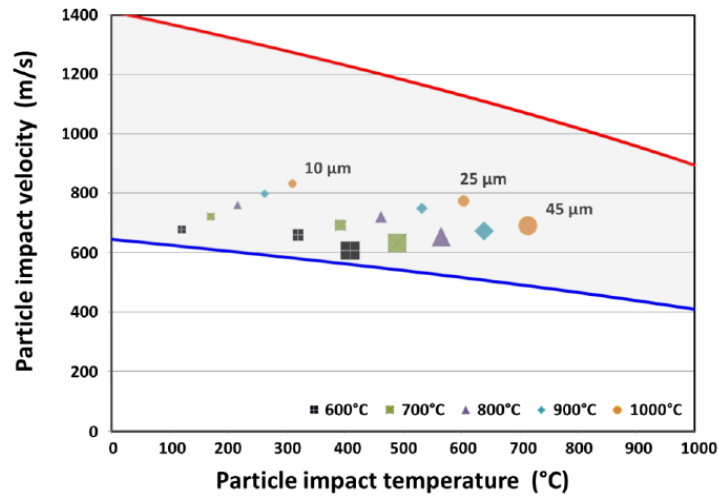


Figura 11. Ventana de depósito ilustrada en el plano de velocidad de partícula y temperatura de partícula para polvo de titanio rociado con nitrógeno y boquilla tipo D24 a 4 MPa (580 psi). Los puntos de datos muestran las condiciones de impacto correspondientes a partículas de diferentes tamaños: (A) 10, (B) 25 y (C) 45  $\mu\text{m}$ . La línea inferior (azul) muestra la velocidad crítica y la línea superior (roja) muestra la velocidad de erosión [17].

Para cuantificar la distancia desde el límite inferior de la ventana de depósito, se puede considerar la relación entre la velocidad de las partículas y la velocidad crítica,

es decir,

$$\eta = \frac{v_p}{v_c} \tag{Ecuación 5}$$

Curiosamente, las características de depósito por Rociado Térmico en Frío parecen ser una función única de esta relación. Como ejemplo, la figura 12 muestra la resistencia normalizada de los recubrimientos de titanio Rociados en Frío como una función de  $\eta$ . Como se muestra en la figura 12, existe una relación lineal entre la resistencia del recubrimiento y  $\eta$ , independientemente de las condiciones de Rociado Térmico en Frío o del tamaño de partícula [17].

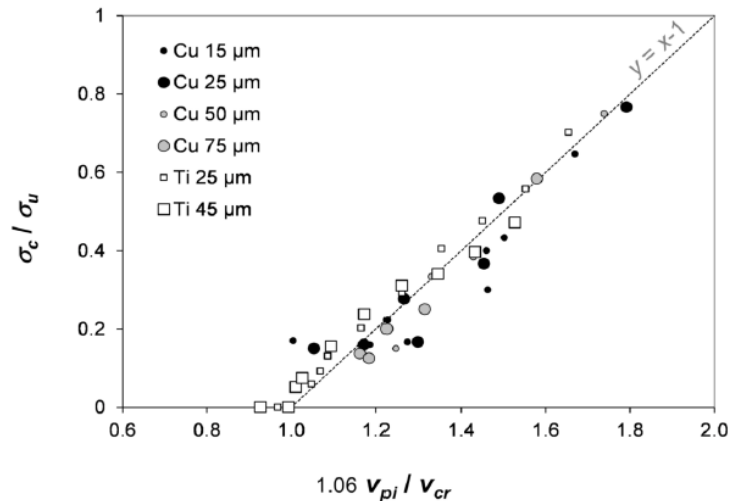


Figura 12. Comportamiento de la fuerza cohesiva frente a la relación de velocidad para un recubrimiento de Titanio y un recubrimiento de Cu. Los valores medidos de la fuerza cohesiva normalizada de los recubrimientos de titanio rociados en frío como se representan frente a la relación de velocidad ajustada usando un factor de corrección de  $f = 1.06$  [17].

El punto principal sobre la relación de velocidades,  $\eta$ , es que, por un lado, combina los resultados de los cálculos de dinámica de fluidos con los de las consideraciones de la mecánica de sólidos y, por otro lado, se relaciona únicamente con las propiedades finales del recubrimiento. Por lo tanto, los materiales iniciales y los parámetros del proceso pueden correlacionarse con las propiedades finales. El concepto de modelado integrado mediante la aplicación de la relación de velocidades se resume en la figura 13 [17].

Como se discutió anteriormente, las propiedades de los depósitos Rociados en Frío pueden verse afectadas por defectos e interfaces no adheridas. No obstante, este

problema puede minimizarse mediante el uso de relaciones de velocidad relativamente altas, normalmente superiores a 1,5. Además, los tratamientos térmicos posteriores al Rociado Térmico en Frío se pueden utilizar para aumentar la extensión de las áreas unidas y para cerrar las discontinuidades restantes [17].

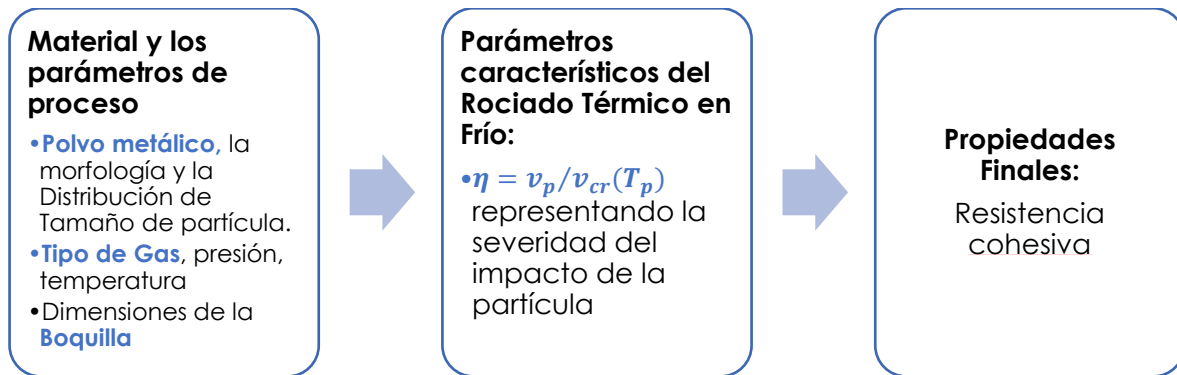


Figura 13. Concepto de modelado integrado, ilustrado mediante la definición del parámetro característico de Rociado Térmico en frío,  $\eta$  [17].

#### 2.1.4. Caracterización de los recubrimientos de Rociado Térmico en Frío.

La caracterización de las microestructuras rociadas permite el desarrollo de una comprensión de la evolución termo-mecánica del recubrimiento y aclara los mecanismos de unión tanto dentro del revestimiento como en la interfaz recubrimiento-sustrato.

La evaluación de la tensión residual del recubrimiento y el comportamiento de relajación del recubrimiento después de los tratamientos térmicos se vuelve imperativo para establecer la funcionalidad confiable del recubrimiento para la aplicación propuesta. Los métodos de caracterización microestructural que incluyen microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, difracción son esenciales para comprender el proceso a través de la deformación plástica severa de los polvos metálicos. Los análisis de microdureza, nanoindentación y tensión residual contribuyen a una comprensión más completa del recubrimiento formado.

La definición de pruebas destructivas y no destructivas se encuentran definidos en el capítulo 4 para el alcance definido en esta tesis, así como sus respectivas técnicas y estándares que están definidos por ASTM (American Standard Testing of Materials).

## **2.2. TRIBOLOGÍA**

La palabra Tribología, proviene del griego y su raíz *Tribo* significa frotamiento y es la ciencia encargada del estudio del frotamiento [18]. La definición exacta, es la de ciencia que estudia como interactúan dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo. Las interacciones en la que se denomina como interfase tribológica son muchas y complejas. Su estudio requiere un amplio conocimiento en disciplinas como física, química, mecánica del estado sólido, ingeniería de materiales, diseño de maquinaria, etc.

Previo a definir los mecanismos que interactúan en una interfaz tribológica en movimiento relativo se tiene en cuenta que cuando dos superficies se ponen en contacto se puede definir un área aparente de contacto y un área real de contacto [18].

El área real de contacto está formada por la suma de todos aquellos puntos discretos donde las dos superficies están en contacto a distancias atómicas. Y el área aparente es aquella que sólo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto.

Por ende, el área real de contacto es función de la rugosidad, propiedades interfaciales del material (elasticidad y plasticidad) y las condiciones de carga aplicadas.

### **2.2.1. Fricción**

La fricción es la resistencia u oposición al movimiento de dos cuerpos que se encuentran en contacto [18]. Es decir, la fuerza tangencial resistiva que se crea

cuando la fricción no depende del material, es una respuesta del sistema a una determinada acción.

Matemáticamente se define fuerza de fricción como:

$$F = \mu W \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

F es la Fuerza de fricción,

W es la carga normal sobre el contacto

$\mu$  es una constante conocida como el coeficiente de fricción.

Existen dos tipos de coeficiente de fricción: el estático ( $\mu_s$ ) y el cinético ( $\mu_k$ , independiente de la carga normal). En el caso de fricción estática es posible expresar esta ley en términos de ángulo de reposo límite  $\theta$  definido por:

$$\mu_s = \tan\theta \quad \text{Ecuación 7}$$

En esta ecuación,  $\theta$  es el ángulo tal que un cuerpo de algún peso, colocado sobre un plano inclinado a un ángulo menor que  $\theta$  desde la horizontal permanecerá estacionario mientras que si se aumenta la inclinación del ángulo a  $\theta$ , el cuerpo empezará a deslizar hacia abajo [18].

Estas consideraciones se cumplen igualmente para los casos de fricción sin y con lubricación. El coeficiente de fricción sin lubricación puede variar en un amplio rango, desde valores muy pequeños de 0.02 a valores tan grandes como 10 o incluso mayores en el caso de metales blandos y limpios deslizando contra ellos mismos en vacío [18].

## 2.2.2.Desgaste

Se define desgaste como el proceso de remoción de material debido al movimiento relativo de esta superficie respecto otra en contacto. En dicho proceso el material puede ser removido de la superficie y expulsado fuera de la región de contacto. También puede ser transferido a la otra superficie y quedarse adherido a ella o romperse y generar **debris** que puede quedar, en parte, atrapado en el contacto. En el caso de que se produzca una transferencia de material la pérdida de masa neta de la interfase es cero, siendo una o ambas superficies desgastadas. La evolución de la fricción está vinculada al desgaste, aunque su relación no es bien entendida [18].

Existen varios tipos de desgaste, de los cuales, los principales son:

### 2.2.2.1.Desgaste Adhesivo

En el área de contacto real entre dos superficies, puede ocurrir la adhesión entre las asperezas y con el movimiento relativo entre las superficies fracturar las partes adheridas formando fragmentos adheridos y/o transferidos a la otra superficie, así como desprenderse y formar partículas de debris.

### 2.2.2.2.Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo ocurre cuando las asperezas de una superficie dura o **debris** duro desliza sobre una superficie más blanda produciendo desgaste por deformación plástica fractura.

### 2.2.2.3. Desgaste por fatiga

La fatiga en la superficie y fatiga subsuperficial se observa durante deslizamiento y apisonamiento repetido. Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas superficiales y

subsuperficiales, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos, dejando grandes hoyos en la superficie (fig. 14). Antes de este punto crítico el desgaste del material es despreciable, lo que no sucede con el desgaste causado por un mecanismo adhesivo o abrasivo, donde el desgaste causa un deterioro gradual del material desde el inicio del proceso. Por tanto, la cantidad de material removido debido a la fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos del número de revoluciones o ciclos de trabajo antes de que ocurra la falla por fatiga.



Figura 14. Ejemplificación de desgaste por fatiga

#### 2.2.2.4. Desgaste por impacto

El desgaste por impacto comprende dos amplios tipos de fenómenos de desgaste [19]:

- **El erosivo (partículas al azar).** La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas por un fluido, en general aire o agua, o también por gotas líquidas [19].
- **El percusivo (impactos repetidos en un punto).** La percusión ocurre por impactos repetidos de cuerpos sólidos de tamaño mayor [19].

El desgaste por impacto es una forma de abrasión, que generalmente se trata diferente porque la presión del contacto crece con la energía cinética del flujo de partículas en un chorro de aire o líquido cuando encuentra la superficie. La

velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y el tamaño medio de las partículas de abrasivo dan una medida de la energía cinética de las partículas que chocan. Como en el caso del desgaste abrasivo, el desgaste erosivo ocurre por deformación plástica y fractura frágil, dependiendo del material que está siendo erosionado y de los parámetros de operación [18].

Para esta investigación en términos de desgaste estamos considerando las aplicaciones típicas donde será empleado el recubrimiento de Inconel 625 propuesto para trabajar sobre un sustrato de hierro fundido, así como sus principales tipos de desgaste que serán el desgaste abrasivo y lo evaluaremos a través de las pruebas de rasgado/rayado.

### **2.2.3. Pruebas de desgaste por rasgado/rayado**

Heavens fue el primero en usar esta prueba, después de Benjamín y Weaver y muchos investigadores más han utilizados el mismo principio, pero haciendo cambios en el modelo teórico original. Una de las razones de la amplia aceptación de esta prueba en la práctica es debido al que es un ensayo sencillo que requiere poca preparación de la muestra, suministra resultados cuantitativos de adhesión y es muy rápida [19].

Este ensayo consiste básicamente en realizar una indentación con un indentador de geometría Rockwell C (indentador cónico de ángulo apical 120° con radio de ~200  $\mu\text{m}$ ) mientras la muestra o el indentador se desplaza en una dirección (dirección del rayado) manteniendo en todo momento la punta del indentador en contacto con la muestra [19]. Este rayado puede realizarse a carga constante durante toda una raya y aumentando la carga en rayas sucesivas, o se puede hacer aumentando la carga progresivamente en una única raya [19]. La carga aplicada  $W$  es aumentada hasta que el surco de deformación en el sustrato causa tensiones las cuales resultan en fallas de la capa. La carga más pequeña a la cual el recubrimiento es dañado por falla adhesiva o cohesiva es llamada carga crítica ( $L_x$ ) y es determinada por emisión acústica, por el coeficiente de fricción o por el perfil de penetración y se debe de constatar por microscopía óptica o electrónica.



La definición de falla en este caso puede ser el inicio de agrietamiento alrededor del indentador, desprendimiento de la película, o la producción de un canal en el cual todo el recubrimiento ha sido removido [19].

El tipo de falla del recubrimiento depende en alguna medida de la ductilidad de la película y del sustrato. La figura 15a) muestra un esquema de la forma como se realiza una prueba de rayado, en la figura 15b) se puede observar una gráfica típica del coeficiente de fricción vs la carga aplicada. A cargas pequeñas, el coeficiente de fricción corresponde al del recubrimiento y en medida en que se aumenta la carga, la fricción empieza a aumentar como se van generando fallos en el recubrimiento. Generalmente, para recubrimientos delgados duros, aparecen microgrietas en la película durante el rayado antes de la falla de adhesión final [19]. El punto señalado como carga crítica menor corresponde a la carga mínima a la cual ocurre la primera grieta. El punto en el que se indica la carga mayor corresponde a la carga a la cual ocurre el desprendimiento completo del recubrimiento.

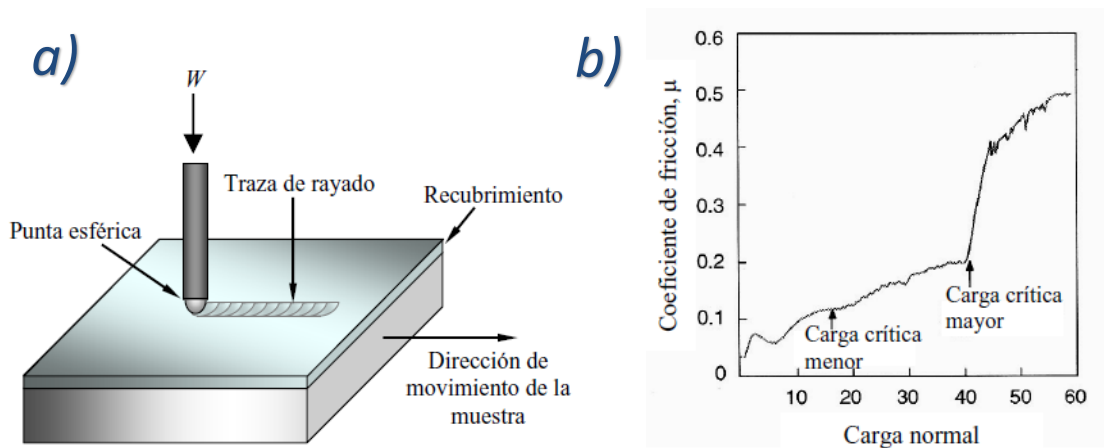


Figura 15. a) Esquema de la prueba de rasgado/rayado "Scratch Test" y b) Gráfica típica del coeficiente de fricción en función de la carga aplicada.

La carga crítica será en general, función de una serie de parámetros que se clasifican en dos grupos [19]:

1. Intrínsecos [19]:

a. Parámetros intrínsecos a la técnica medida [19]:

- i. Radio de la punta del indentador
- ii. Velocidad de rasgado/rayado
- iii. Relación de carga: Velocidad a la cual se incrementa la carga linealmente desde un valor inicial establecido hasta el valor final deseado [19].
- iv. Desgaste del diamante [19].

2. Extrínsecos [19]:

a. Los parámetros extrínsecos a la técnica de medida [19]:

- i. **Propiedades del sustrato** que influyen en el nivel de tensiones residuales acumuladas por la capa [19]:
  1. Dureza
  2. Modulo elástico
  3. Coeficiente de expansión térmica
  4. Rugosidad
- ii. Propiedades de la capa que influyen en el valor de la carga crítica [19]:
  1. Dureza
  2. Modulo elástico
  3. Tensiones residuales
  4. Propiedades de la interfaz
  5. Rugosidad
- iii. Coeficiente de fricción y fuerza de fricción entre la punta del indentador y la capa, también se ha encontrado que influyen en la carga crítica [19].
- iv. Condiciones en la superficie de la capa (existencia de capas lubricantes o superficiales) y condiciones del ensayo (ambiente, humedad, temperatura) pueden afectar la

estructura y propiedades de la capa y el coeficiente de fricción [19].

Cuando los recubrimientos son duros y bien adheridos al sustrato es necesario utilizar fuerzas muy elevadas para conseguir el desprendimiento de los recubrimientos, o bien reducir el radio del indentador para conseguir aumentar la presión. En este último caso se trabaja con fuerzas muy pequeñas (del orden del mN hasta 10N) por lo cual esta técnica se denominado microrayado "Microscratch" [19].

#### **2.2.4.Mecanismos de falla en el sistema capa-sustrato durante una prueba de rayado**

Es posible que la falla del sistema recubrimiento-sustrato, con el consecuente desprendimiento del recubrimiento, se produzca en la interfase, en el volumen de la capa o en el volumen del sustrato. Si la falla se produce en la interfase será de tipo **adhesivo** mientras que si se produce en el volumen de los materiales es de tipo **cohesivo** [19].

Los modos de falla en pruebas de rayado para recubrimientos duros pueden ser separados como se menciona a continuación [19]:

- Agrietamiento a través del espesor incluyendo agrietamiento tensil detrás del indentador, agrietamiento conformal como el recubrimiento es curvado en la traza de rayado. Estas grietas se pueden extender en el sustrato si es suficientemente frágil pero usualmente son detenidas en la interfase en un recubrimiento duro sobre un sustrato más blando [19].
- Desprendimiento del recubrimiento incluyendo desprendimiento compresivo delante del indentador o desprendimiento inducido por recuperación elástica detrás del indentador [19].
- Agrietamiento dentro del recubrimiento incluyendo desprendimiento compresivo delante del indentador o desprendimiento inducido por recuperación elástica detrás del indentador [19].

- Agrietamiento dentro del recubrimiento usualmente observado para recubrimientos gruesos sobre un sustrato blando. La prueba de rayado prácticamente no puede medir la adhesión de recubrimientos más gruesos de 50 mm en su forma convencional, ya que es imposible generar tensiones lo suficientemente grandes en la interfase antes de que ocurra Agrietamiento del recubrimiento [19].
- Agrietamiento duro del sustrato para recubrimientos frágiles sobre sustratos frágiles donde la adhesión es buena, el sistema tiende a portarse como el material en volumen frágil y ocurre el Agrietamiento del sustrato a menos que el recubrimiento sea suficientemente grueso [19].

Para recubrimientos y sustratos dúctiles la prueba es dominada por la deformación plástica y no se observa agrietamiento, pero si se puede observar deslizamiento de la capa sobre el sustrato. Para recubrimientos duros sobre sustratos blandos la deformación del sustrato es predominantemente plástica, mientras que el recubrimiento puede deformarse plásticamente o fracturarse cuando es curvado en la traza creada por la deformación plástica del sustrato. Recubrimientos blandos sobre sustratos más duros tienden a deformarse plásticamente y puede ocurrir alguna extrusión entre la punta y el sustrato, en esta situación ocurre un adelgazamiento del recubrimiento debido a la deformación plástica y el sustrato se fractura de una manera significativa. Para recubrimientos duros sobre sustratos duros la deformación plástica es mínima y la fractura domina la respuesta al rayado [19].

Las características observadas en la traza de rayado residual se pueden comparar con los patrones de referencia previamente publicados a fin de establecer los diferentes modos de falla o fractura [19]

La figura 16 muestra una clasificación de los tipos de falla que se encuentran en un ensayo de rayado [19].

- Figura 16a). **Deformación.** Cuando se aplican pequeñas cargas se produce una deformación elástica y plástica sin causar daño aparente en la capa [19].

- Figura 16b). **Agrietamiento**. Cuando la carga es aumentada se puede originar la aparición de grietas debido a las tensiones incluidas con el indentador [19].
- Figura 16c). **Desconchado**. Estas grietas pueden causar el desprendimiento del sistema bien sean de origen adhesivo o cohesivo [19].
- Figura 16d). **Desprendimiento**. Cuando hay un aumento muy acusado de las fuerzas de fricción (cargas mayores), es probable que ocurra desprendimiento de la capa [19]

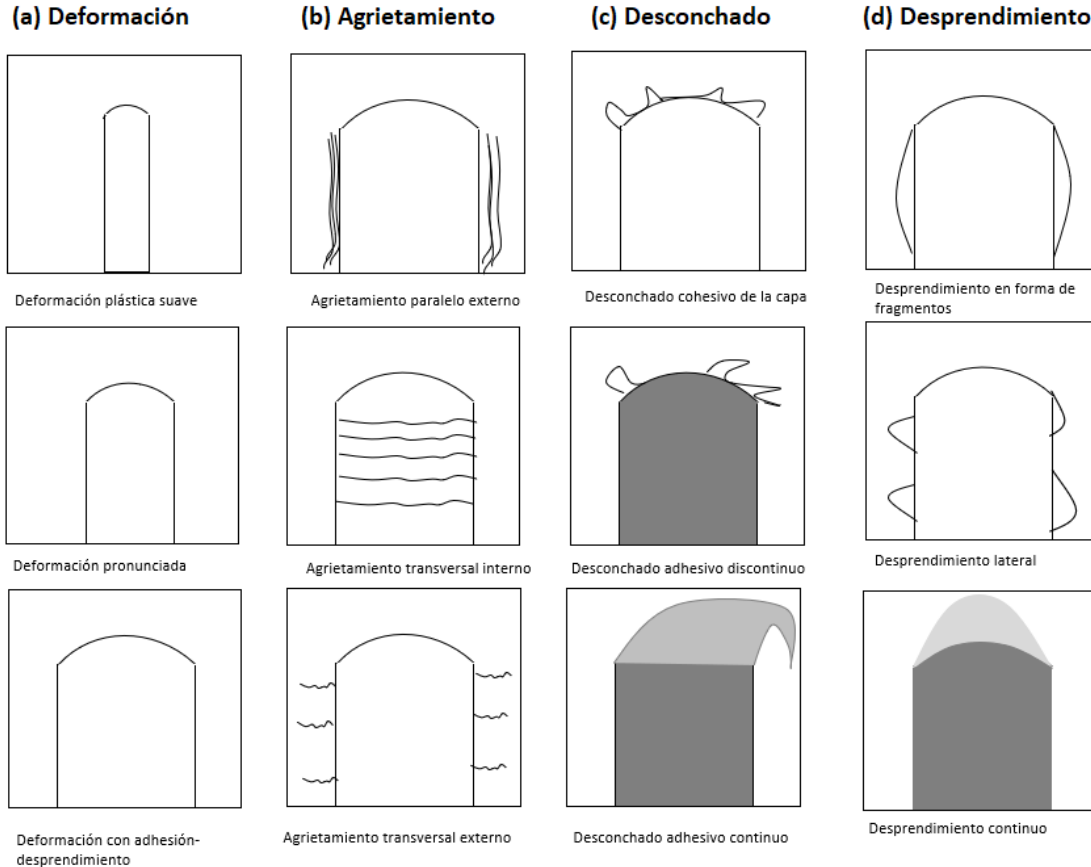


Figura 16. Clasificación de los diferentes mecanismos de falla provocados por un indentador esférico en un sistema capa-sustrato. Las partes oscuras son las zonas del sustrato que han quedado descubiertas [19].

### 2.2.5. Prueba de dureza de rasgado/rayado

Rasgado con carga normal constante en una muestra y en una muestra de referencia utilizando un lápiz. Los datos del ancho de rasgado se utilizan para obtener la dureza del rasgado de la muestra como sigue [18]:

$$H_s = H_{ref} \left( \frac{L_s}{L_{ref}} \right) \left( \frac{W_{ref}}{W_s} \right)^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

donde, los subíndices 's' y 'ref' representan el espécimen de prueba y la muestra de referencia, respectivamente. Los términos H, L y W denotan dureza, carga normal y ancho de rayado, respectivamente. La prueba es utilizada para materiales sólidos y de recubrimiento.

### 2.2.6. Prueba de adherencia por rasgado/rayado

Esta prueba se realiza aplicando carga progresiva (~ linealmente creciente) o constante de acuerdo con la ASTM G171. Prueba progresiva de rasguño de carga. Se mueve un lápiz sobre una muestra superficie con un aumento lineal cargar hasta que ocurra una falla en estado crítico cargas ( $L_{ci}$ ) Fuerza normal ( $F_z$ ) y La fuerza tangencial ( $F_x$ ) se registra. Los eventos de falla son examinados por un microscopio óptico acústico. La emisión (AE) también se mide durante la prueba,  $L_c$  es una función del sustrato de recubrimiento adherencia, radio de la punta del lápiz, tasa de carga, propiedades mecánicas de sustrato y revestimiento, espesor del recubrimiento, tensión interna y distribución del tamaño de falla en la interfaz de recubrimiento de sustrato y fricción entre la punta del lápiz y el revestimiento.

### **3. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO EN FRÍO A ALTA PRESIÓN EN EL SOFTWARE KSS**

#### **3.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN KSS (KINETIC SPRAY SOLUTIONS)**

KSS versión 1.4.0, GmbH 2013 es un software enfocado en las necesidades de usuarios dedicados a la investigación y a la producción del proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión utilizado para simular las condiciones del proceso de Rociado Térmico y obtener los parámetros necesarios para depositar los recubrimientos deseados. El software contiene 4 secciones [19]:

##### **3.1.1. Mapa de Selección de Parámetros (PSM)**

La sección PSM habilita la selección sistemática de parámetros de Rociado Térmico para entender qué condiciones conducen a la máxima calidad de recubrimiento y eficiencia de depósito y conocer los parámetros clave para mejorar el proceso. El PSM ofrece una descripción general de la influencia de los principales parámetros de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión, es decir, la temperatura del gas, la presión del gas y el tamaño de las partículas, sobre la velocidad y la temperatura de las partículas, así como las eficiencias de depósito alcanzables y las resistencias del recubrimiento, todos los parámetros operativos previamente mencionados pueden ser seleccionados en dicha sección. Los cálculos incorporan un rango, en lugar de valores únicos, de parámetros de proceso, esto permite una rápida identificación de las influencias más efectivas y las condiciones óptimas de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión. Los principios teóricos que preceden a los resultados obtenidos en este software están basados en lo establecido en la § 2.1.3. Para visualizar los resultados en el software se debe seleccionar el tipo de gráfica como lo muestra la figura 17, las gráficas obtenidas del software de esta tesis son,  $\eta(T_0)$ ,  $\eta(p_0)$ ,  $\eta(T_0, p_0)$  y  $\sigma(T_0, p_0)$  [19].

**plot selection**

2D plots Impact Parameters

<input type="checkbox"/> $vp(T_0)$	<input type="checkbox"/> $vp(p_0)$	<input type="checkbox"/> $vp(D_p)$
<input type="checkbox"/> $TP(T_0)$	<input type="checkbox"/> $TP(p_0)$	<input type="checkbox"/> $TP(D_p)$
<input type="checkbox"/> $v\_krit(T_0)$	<input type="checkbox"/> $v\_krit(p_0)$	<input type="checkbox"/> $v\_krit(D_p)$

2D plots coating key figures

<input checked="" type="checkbox"/> $\eta(T_0)$	<input checked="" type="checkbox"/> $\eta(p_0)$	<input type="checkbox"/> $\eta(D_p)$
<input type="checkbox"/> $\sigma(T_0)$	<input type="checkbox"/> $\sigma(p_0)$	<input type="checkbox"/> $\sigma(D_p)$
<input type="checkbox"/> $DE(T_0)$	<input type="checkbox"/> $DE(p_0)$	<input type="checkbox"/> $DE(D_p)$

contour plots coating key figures

<input checked="" type="checkbox"/> $\eta(T_0, p_0)$	<input type="checkbox"/> $\eta(p_0, D_p)$	<input type="checkbox"/> $\eta(T_0, D_p)$
<input checked="" type="checkbox"/> $\sigma(T_0, p_0)$	<input type="checkbox"/> $\sigma(p_0, D_p)$	<input type="checkbox"/> $\sigma(T_0, D_p)$
<input type="checkbox"/> $DE(T_0, p_0)$	<input type="checkbox"/> $DE(p_0, D_p)$	<input type="checkbox"/> $DE(T_0, D_p)$

Figura 17. Selección de gráfica en el Software KSS.

### 3.1.2.Simulación

En el módulo de simulación, a diferencia de la herramienta Mapa de selección de parámetros, los cálculos se realizan para un solo conjunto de parámetros de material y proceso. Aquí, se realiza una simulación dinámica de fluidos 1D bien ajustada para el flujo de gas a lo largo del eje de la boquilla en cada ejecución, para el conjunto de parámetros dado. Todos los parámetros esenciales en el proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión se consideran como entrada editable en el módulo de simulación. Los resultados incluyen la velocidad y temperatura de las partículas, los flujos de gas y polvo, el consumo de energía, la tasa de alimentación de partículas, la eficiencia de depósito y la resistencia del recubrimiento [19].

La simulación proporciona 2 módulos:

- **Módulo de Mecánica de Fluidos.** Este módulo calcula las velocidades de los gases y las partículas según el tipo y la forma de la boquilla y comprende la relación entre los parámetros del gas y las condiciones de impacto para diferentes tamaños de polvo y las distancias de separación obteniendo gráficas que muestran el comportamiento de la temperatura del gas y las partículas rociadas, para uno o más materiales previos a la salida de la garganta de la boquilla hasta la distancia de separación programada como lo muestra la fig. 7 [17,62] y los cálculos están realizados en base a la ecuación no. 4, véase el detalle en la sección 2.1.3.3.1.2.



- **Módulo de la Ventana de Depósito.** Este módulo calcula las condiciones de impacto de las partículas para comprender las propiedades del recubrimiento y la relación entre las propiedades del material y los parámetros operativos. Los cálculos que representan el gráfico obtenido en esta sección están basados en la explicación dada en la sección 3.1.2 4.

La entrada de datos del módulo de simulación considera la forma y dimensiones del sustrato y el espesor requerido.

Todos los datos y resultados relevantes de este módulo se guardan automáticamente para su uso posterior en otras herramientas, v.g., para la planificación del proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión cuando se realice el recubrimiento y la estimación de costos [19].

**Base de Datos.** Los parámetros relacionados al sistema que se desea simular son elegidos en esta sección que está compuesta por 5 secciones:

- **Instalaciones del proceso.** Proveedor de la tecnología, variedad de sus equipos, las capacidades mínimas y máximas de presión, potencia eléctrica, flujos máximos de gas y la tasa de alimentación de suministro de polvo metálico.
- **Boquillas** Las boquillas disponibles dependiendo del tipo de equipo definido en la sección de Instalaciones, distancia de rociado mínima y máxima.
- **Tipo de Gas.** N<sub>2</sub>, He,
- **Tipo de Material.** Aquí, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión se definen mediante los siguientes parámetros: Elemento base, densidad, punto de fusión, capacidad calorífica, resistencia a la tensión. Los datos proporcionados se toman de la literatura, evaluando diferentes fuentes. Para definir más materiales, los resultados de las investigaciones o las mediciones de la propia literatura se pueden definir y almacenar individualmente [19].

- **Polvo Metálico.** Esta sección define la distribución de tamaño de partícula de los materiales seleccionados.

### 3.1.3. Literatura para consulta

Este módulo contiene los vínculos de investigación relacionados con los principios y cálculos bajo los cuales está basado el software KSS, la dinámica de fluidos del rociado térmico en frío y los artículos de investigación relacionados a la velocidad crítica y los mecanismos de adhesión.

## 3.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES PARA LA SIMULACIÓN DE HPCS A TRAVÉS DE KSS

Para comenzar con la simulación utilizando el software KSS se deben establecer las condiciones bajo las cuales, estaría el sistema propuesto desarrollando la simulación requerida y, por ende, cuál de ellas se asemeja a una aplicación de forma idónea, si se entiende por idóneo aquello que presente un mejor resultado en el desempeño en propiedades mecánicas del recubrimiento y con un menor costo.

### 3.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL INCONEL 625

Las propiedades del Inconel 625 están mencionadas en la tabla 3.2 y 3.3 como información complementaria que se utiliza para modificar la base de datos y actualizarla para realizar el análisis de la simulación y el análisis de la aplicación.

Tabla 3.1. Las propiedades del Material Inconel 625 acorde a su hoja de información técnica del proveedor del polvo y tal como se encuentra dentro del software KSS.

Material	Densidad g/cm <sup>3</sup>	UTS MPa	% Elongación	T <sub>fusión</sub> , °C	Cp J/(kg K)
Inconel 625	8.44	2000	80	1290	410

Tabla 3.2. Propiedades del polvo Inconel 625 de acuerdo con las hojas de información técnica del proveedor del polvo y verificada a través de un análisis de distribución de tamaño.

Material	% Factor de empaquetamiento	D10 $\mu\text{m}$	D50 $\mu\text{m}$	D90 $\mu\text{m}$
Inconel 625	50	>20	[32]	<40

### 3.4. SIMULACIÓN DE HPCS A TRAVÉS DE KSS PARA INCONEL 625

#### 3.4.1. Cálculo del Mapa de Selección de Parámetros (PSM)

El PSM proporciona una primera aproximación de la velocidad de la partícula, la temperatura de la partícula, la velocidad crítica para la unión y la relación de velocidad  $\eta = v_p / v_{cr}$ , que se utiliza como una medida de la calidad del depósito rociado en frío. Como regla general,  $\eta = 1.5$  (§ 2.1.3.4) se considera como un punto de referencia para asegurar una calidad de recubrimiento suficientemente alta. La baja calidad puede estar asociada con niveles más altos de porosidad, menor eficiencia de depósito y menores fuerzas de cohesión. Los valores más grandes pueden dar como resultado un aumento marginal de la calidad al precio de un mayor consumo de gas y, por lo tanto, mayores costos.

#### 3.4.2. PSM para el polvo metálico Inconel 625

Para el polvo Inconel 625 con las condiciones de procesamiento fijas, definiremos 4 modelos de trabajo descritos en la Tabla 3.5 y la introducción de los datos puede observarse en la Figura no. 19:

Tabla.3.3. Modelos de trabajo que se utilizaron en la simulación con el software KSS.

Inconel 625				
Nombre Modelo	Temperatura del Gas	Presión del gas	Angulo derociado	Modelo
6A1	Low Temp (Mínima Temperatura)	Low Pressure (Min Presión)	90°	Modelo 1
6A2	Low Temp (Máxima Temperatura)	High Pressure (Máx Presión)	90°	Modelo 2

6A3	High Temp (Mínima Temperatura)	Low Pressure (Mín Presión)	90°	Modelo 3
6A4	High Temp (Máxima temperatura)	High Pressure (Máx Presión)	90°	Modelo 4

## Parámetros de entrada Inconel 625

**equipment configuration** hide

equipment:

nozzle:

Powder injection has to be within the nozzle.

x start position powder injection:  m

stand-off distance:  m

**process gas parameter** hide

process gas temperature is above the maximum temperature of the facility

gas temperature:  °C

gas pressure:  bar

process gas 1:

volume flow rate gas: 91.6 Nm<sup>3</sup>/h

**carrier gas conditions** hide

carrier gas: Stickstoff

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

carrier gas and particle temperature:  °C

injection speed particle:  m/s

Low Temp = 900°C

High Temp = 1100°C

Low Pressure = 35 bar

High Pressure = 50 bar

Figura 18. Parámetros de entrada utilizados en los modelos de trabajo que se utilizaron en la simulación con el software KSS

### 3.4.3. Cálculo de las condiciones de impacto de partículas

El módulo de simulación del software KSS se usa para calcular las condiciones de impacto (temperatura y velocidad de las partículas al impactar sobre el sustrato) para un solo conjunto de materiales y parámetros de proceso (no un rango de parámetros). Se utiliza un programa de simulación dinámica de fluidos 1D (§2.1.3). para calcular el flujo de gas a lo largo del eje de la boquilla para cada conjunto de parámetros, por lo tanto, los resultados son más precisos en comparación con los cálculos de PSM. Por otro lado, el módulo PSM proporciona una visión general sobre el efecto de los parámetros del proceso (tamaño de partícula, temperatura del gas y presión del gas) en la calidad del recubrimiento, por lo tanto, debe usarse antes de la simulación, para una guía inicial para la selección del proceso óptimo condiciones.

### 3.4.4. Resultados de las simulaciones obtenidas para los modelos de trabajo.

#### 3.4.4.1. Modelo 1(6A1)

Los cálculos obtenidos de PSM para el Modelo 1(6A1):

**PSM**

Material Inconel 625 ▼

nozzle OUT 1 ▼

gas Nitrogen ▼

consider particle size effect

fix      range

gas temperature 900 100 - 1100 °C

gas pressure 35 0 - 50 bar

particle diameter 25 1 - 45 μm

Figura 19. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación.

calculated values (Ø)							
vp	610 m/s	Tp	578 °C	v_crit	514 m/s	mass load gas	1.0 %
η	1.19	σ	177 MPa	DE	93 %	electric power consumption	30 kW

Figura 20. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.

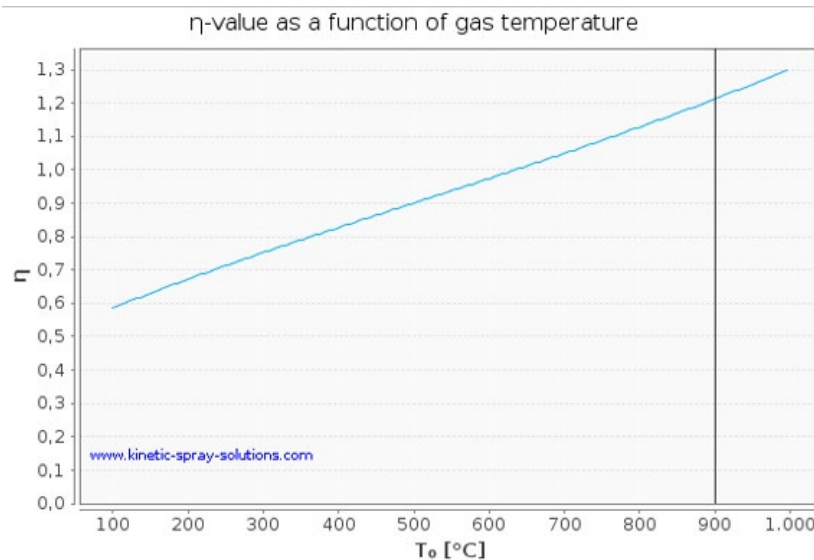


Figura 21. Resultados del valor  $\eta$  en función de la temperatura del gas.

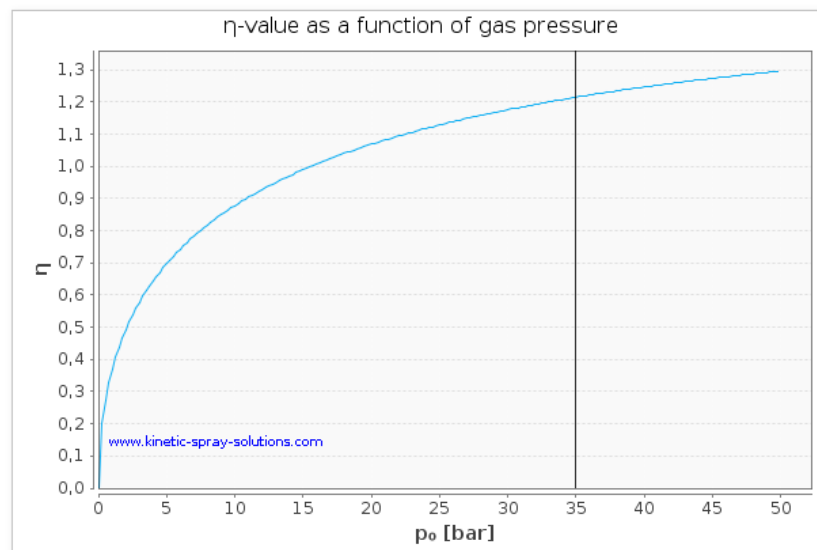


Figura 22. Resultados del valor  $\eta$  en función de la presión del gas.

**equipment configuration** hide

equipment

nozzle

Powder injection has to be within the nozzle.

x start position powder injection  m

stand-off distance  m

---

**powder feeder** hide

powder feeder

rotation feeder disk  rpm

powder Inconel 625 Inconel 625

D10 20  $\mu$ m    D50 35  $\mu$ m    D90 40  $\mu$ m

feedrate: 13.25g/min 0.80kg/h

---

**process gas parameter** hide

gas temperature  °C

gas pressure  bar

process gas 1

volume flow rate gas 66.9 Nm<sup>3</sup>/h

Figura 23. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado.

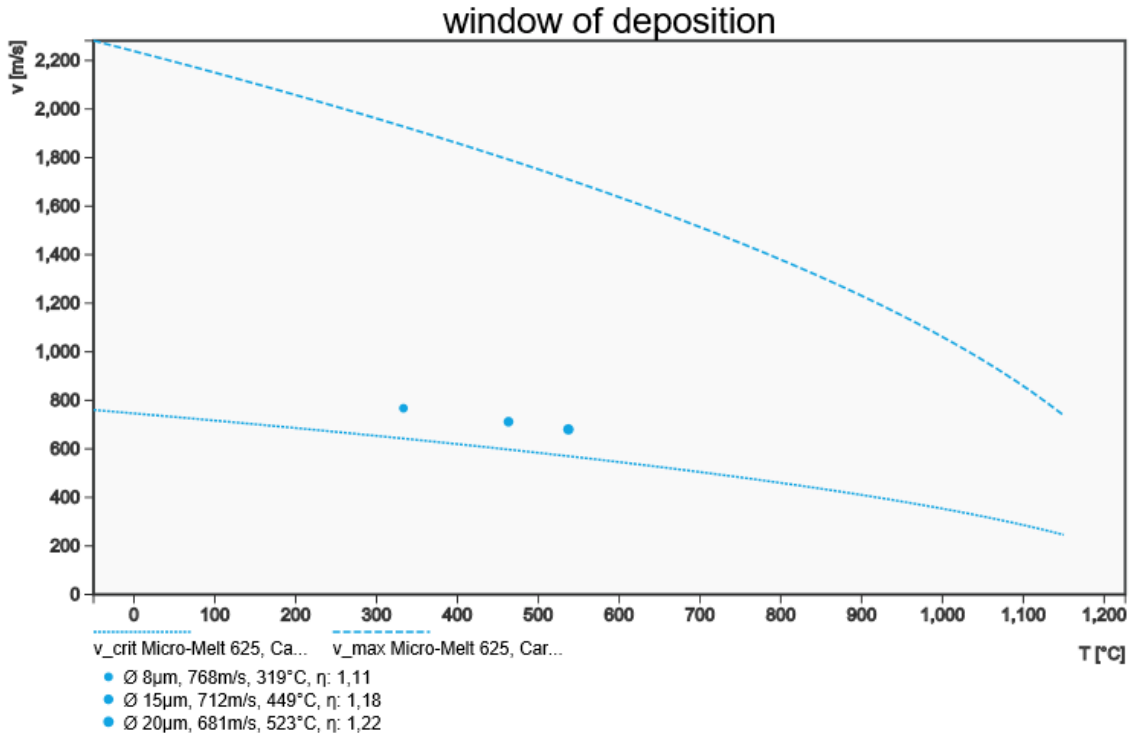


Figura 24. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.

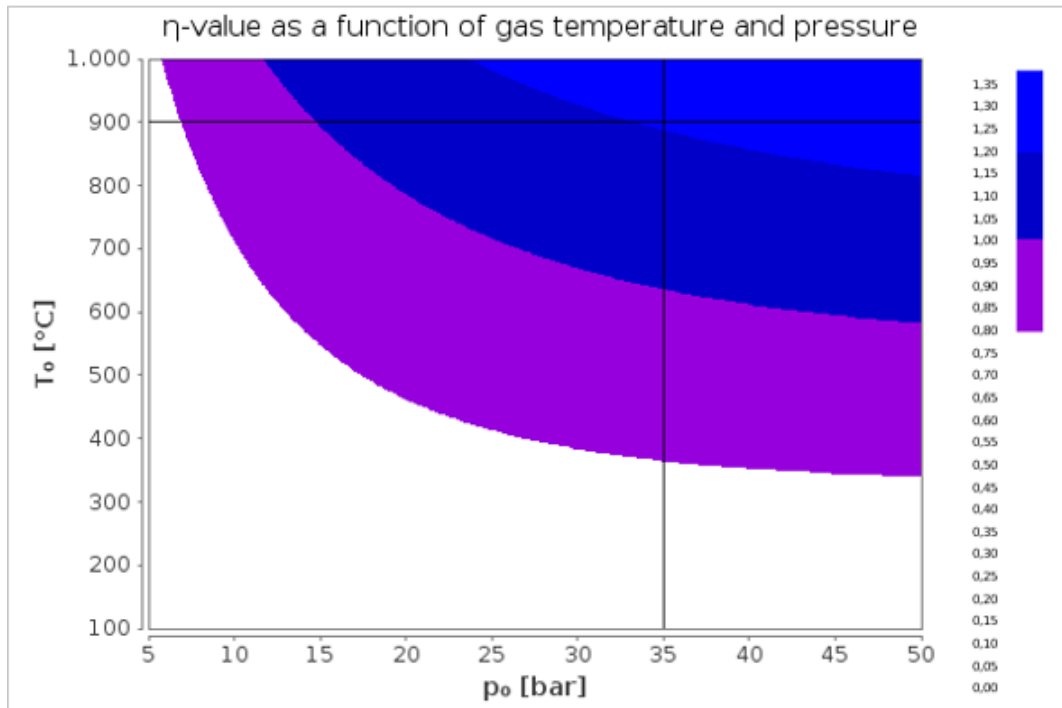


Figura 25. El Valor de  $\eta$  en función de la presión 35 Bar

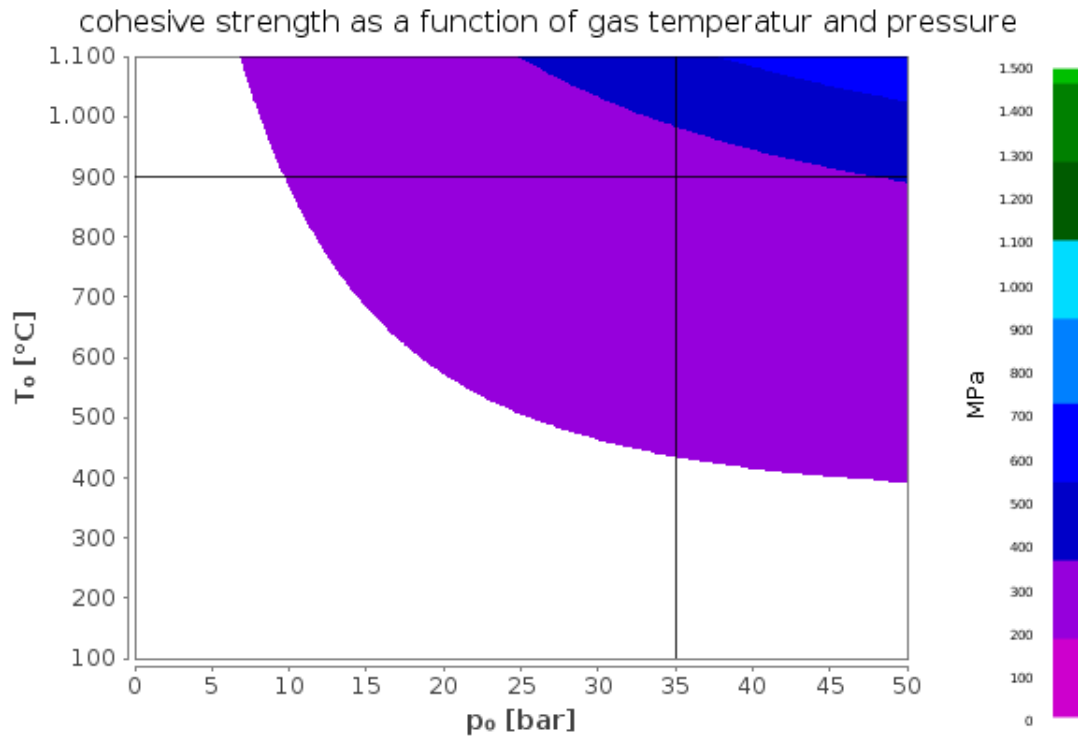


Figura 26. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 900° y la presión a 35 bar

Según los cálculos de PSM, se espera que el rociado en frío del polvo Inconel 625 con nitrógeno a 35 bar y 900 ° C se asocie con una relación de velocidad inferior a 1.5, que es un valor subóptimo, si se entiende por subóptimo todos aquellos valores de  $\eta$  menor a 1.5 y que resulta en una eficiencia de depósito de 93% y 177 MPa de resistencia cohesiva. Según el PSM, un aumento adicional en la relación de velocidad requiere aumentar la temperatura o presión del gas de proceso. Sin embargo, un aumento adicional debe ser correctamente analizado ya que la temperatura puede no ser técnicamente recomendado con el equipo dado que su máxima capacidad se encuentra limitada a los 1100°C. En el modelo 6A2, 6A3 y 6A4 de la simulación y del proceso se podrá verificar lo observado en las gráficas previamente presentadas.



### 3.4.4.2. Modelo 2(6A2)

Los cálculos obtenidos de PSM para el Modelo 2(6A2) (900°C y 50 bar):

**PSM**

Material: Inconel 625

nozzle: OUT 1

gas: Nitrogen

consider particle size effect:

fix range

gas temperature: 900 100 - 1100 °C

gas pressure: 50 5 - 60 bar

particle diameter: 20 1 - 150 μm

Figura 27. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación.

calculated values (∅)							
vp	648 m/s	Tp	579 °C	v_crit	514 m/s	mass load gas	0.7 %
η	1.26	σ	248 MPa	DE	96 %	electric power consumption	43 kW

Figura 28. Resultados de acuerdo con las variables calculadas

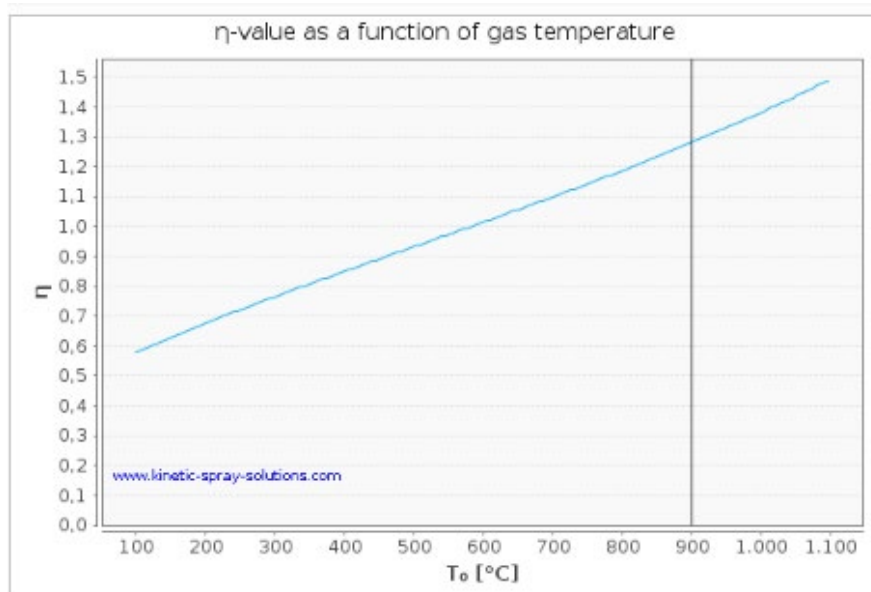


Figura 29. Resultados del valor η en función de la temperatura del gas.

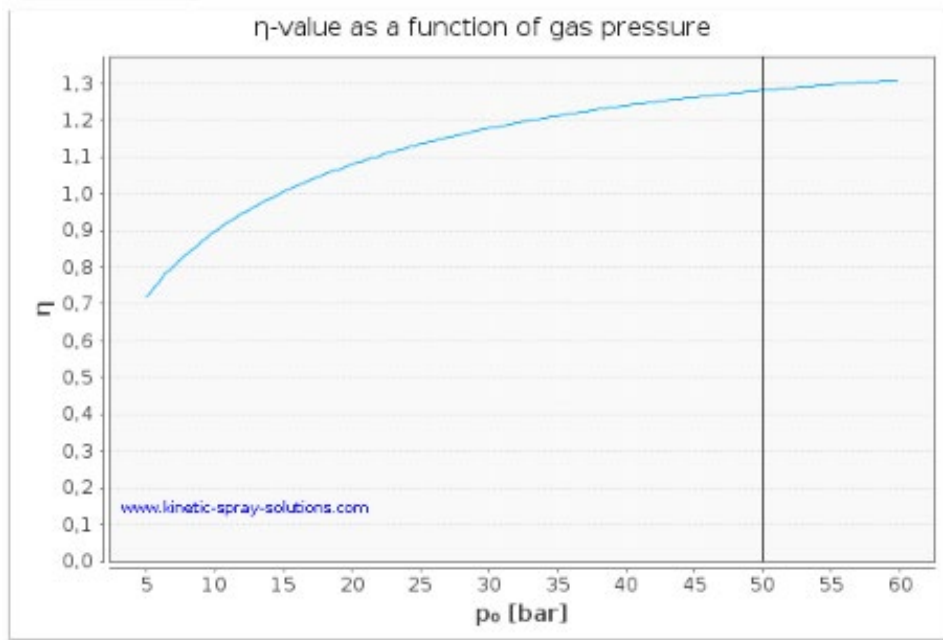


Figura 30. Resultados del valor  $\eta$  en función de la presión del gas.

**equipment configuration** hide

equipment:

nozzle:

Powder injection has to be within the nozzle.

x start position powder injection:  m

stand-off distance:  m

---

**powder feeder** hide

powder feeder:

rotation feeder disk:  rpm

powder: Inconel 625 Inconel 625

D10: 20 μm    D50: 35 μm    D90: 40 μm

feedrate: 13.25g/min    0.80kg/h

---

**process gas parameter** hide

gas temperature:  °C

gas pressure:  bar

process gas 1:

volume flow rate gas: 95.5 Nm<sup>3</sup>/h

**process gas 2** show

Figura 31. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado.

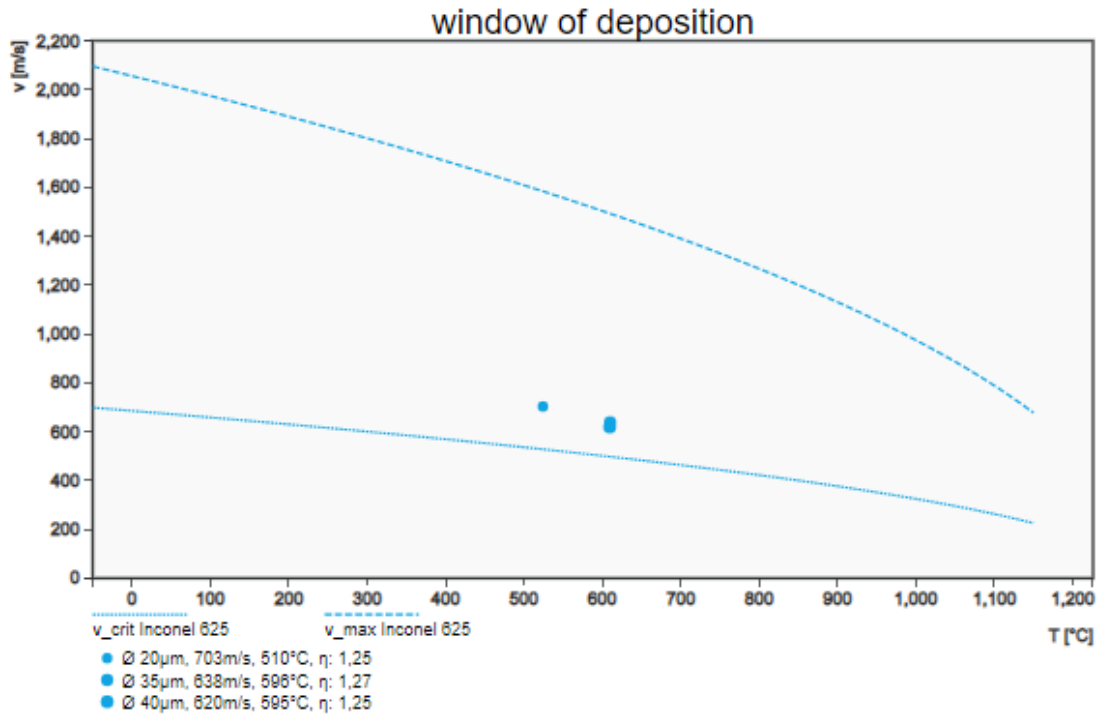


Figura 32. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.

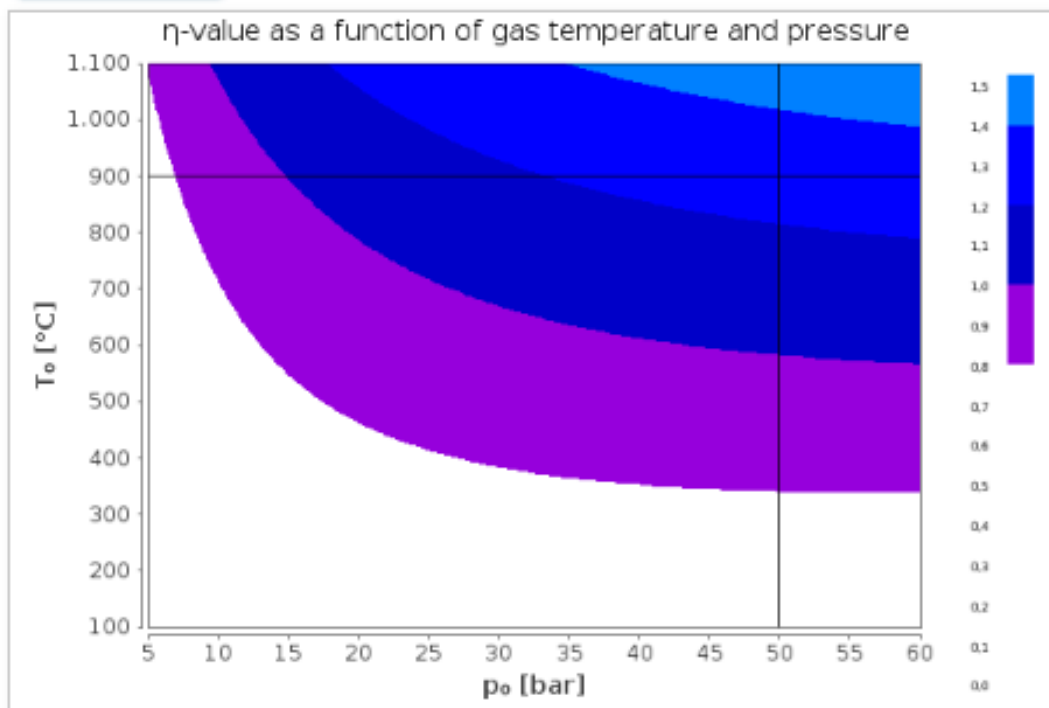


Figura 33. El Valor de  $\eta$  en función de la presión 35 Bar y la temperatura.

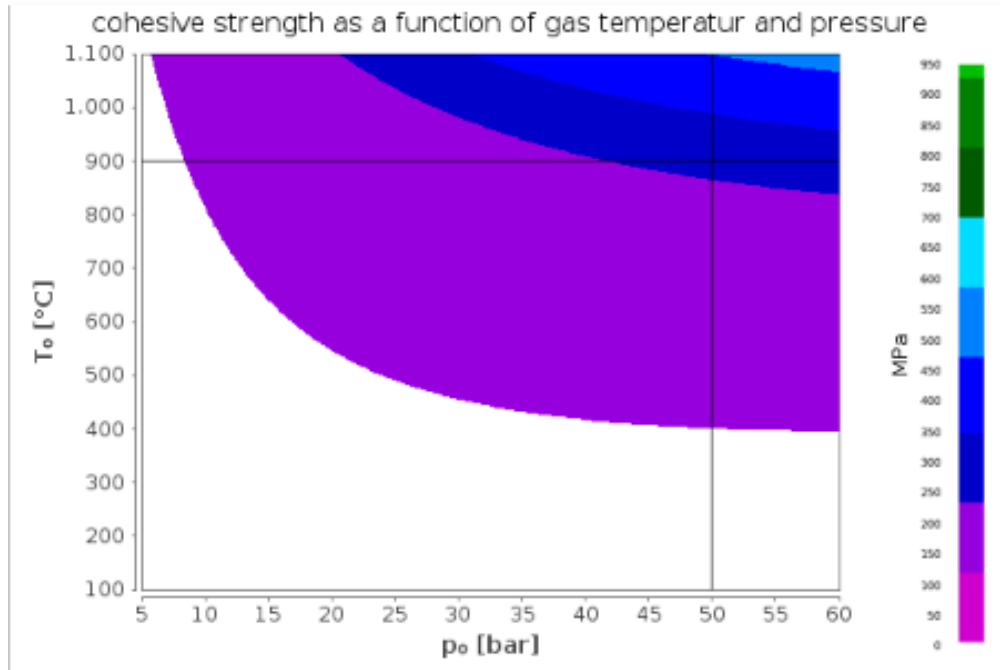


Figura 34. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 900° y 35 bar

Según los cálculos de PSM, se espera que el rociado en frío del polvo Inconel 625 con nitrógeno a 50 bar y 900 ° C se asocie con una relación de velocidad inferior a 1.5 y resulta en una eficiencia de depósito del 96% y 248 MPa, mejorando su eficiencia de depósito y a su vez la resistencia cohesiva. Un aumento adicional en la relación de velocidad puede sugerirse a partir del aumento con respecto a la condición del Modelo 1 (6A1) o presentará el Modelo 4(6A4).

### 3.4.4.3. Modelo 3(6A3)

Los cálculos obtenidos de PSM para el Modelo 3(6A3) (1100°C y 35 bar):

The screenshot shows the PSM (Mapa de Selección de Parámetros) interface with the following settings:

- Material: Inconel 625
- nozzle: OUT 1
- gas: Nitrogen
- consider particle size effect:
- gas temperature: 1100 (fix) / 100 - 1200 (range) °C
- gas pressure: 35 (fix) / 5 - 60 (range) bar
- particle diameter: 20 (fix) / 1 - 150 (range) μm

Figura 35. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación.

calculated values (∅)					
vp	642 m/s	Tp	725 °C	v_crit	458 m/s
η	1.40	σ	380 MPa	DE	99 %
				mass load gas	1.0 %
				electric power consumption	35 kW

Figura 36. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.

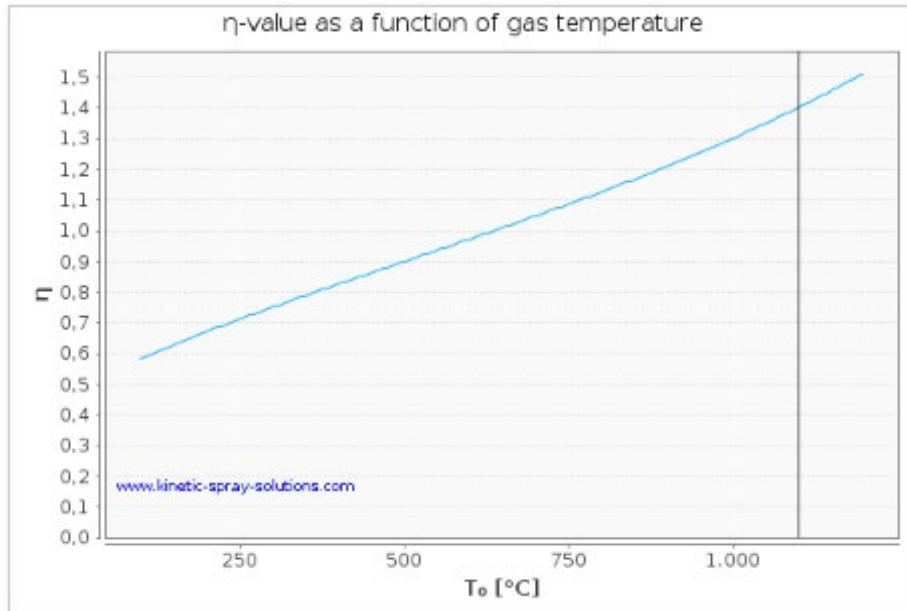


Figura 37. Resultados del valor  $\eta$  en función de la temperatura del gas.

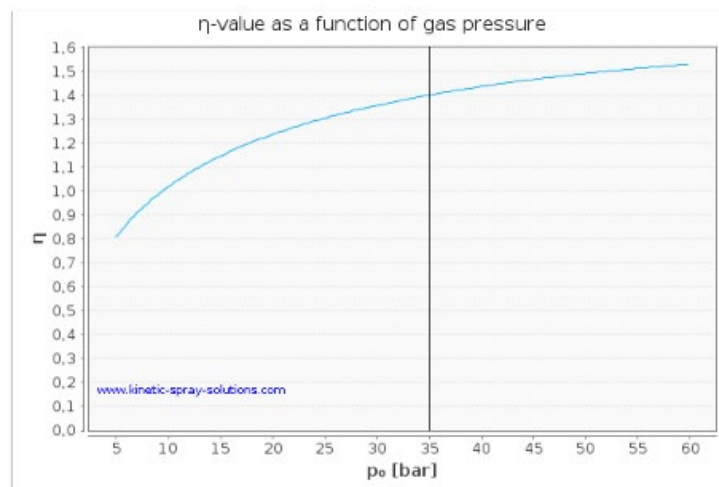


Figura 38. Resultados del valor  $\eta$  en función de la presión del gas.

**equipment configuration** hide

equipment:

nozzle:

x start position powder injection:  m

stand-off distance:  m

**powder feeder** hide

powder feeder:

rotation feeder disk:  rpm

powder: Inconel 625 Inconel 625

D10: 20  $\mu\text{m}$     D50: 35  $\mu\text{m}$     D90: 40  $\mu\text{m}$

feedrate: 13.25g/min 0.80kg/h

**process gas parameter** hide

gas temperature:  °C

gas pressure:  bar

process gas 1:

volume flow rate gas: 61.7 Nm<sup>3</sup>/h

Figura 39. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado.

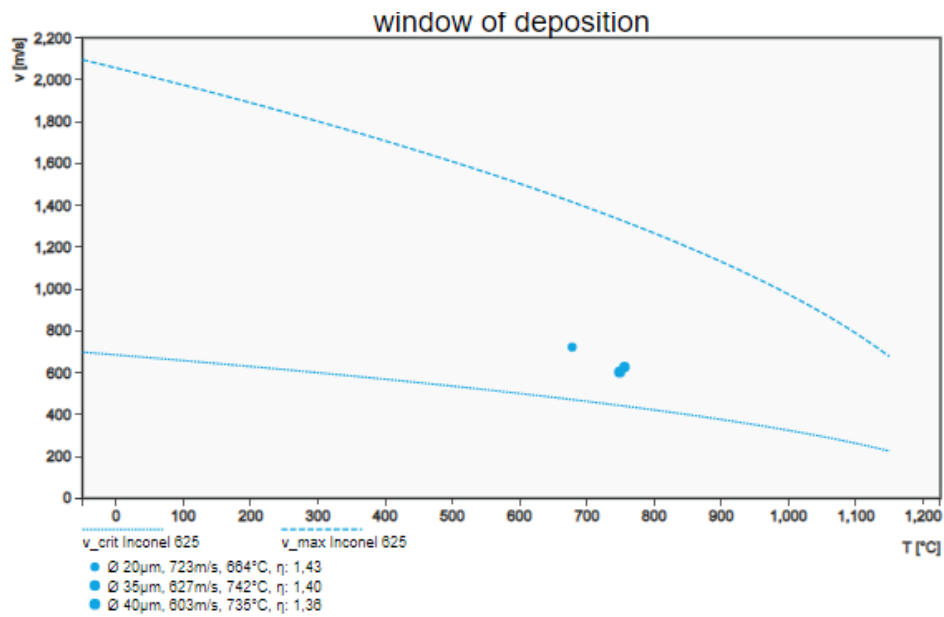


Figura 40. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.

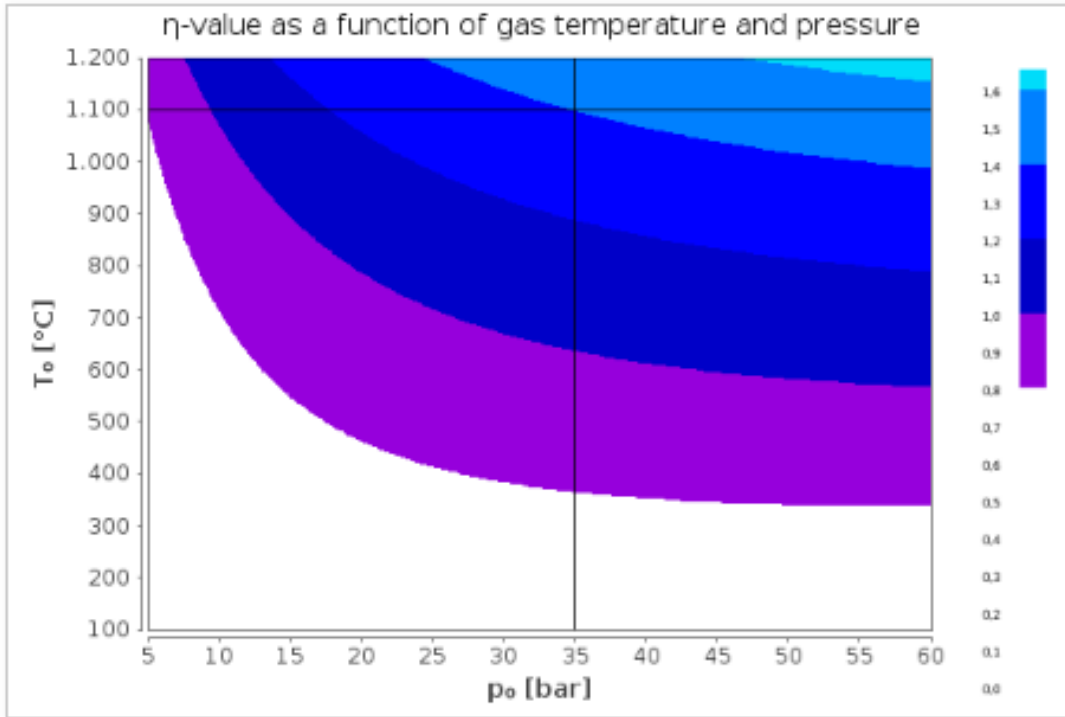


Figura 41. El Valor de  $\eta$  en función de la presión 35 Bar y la temperatura.

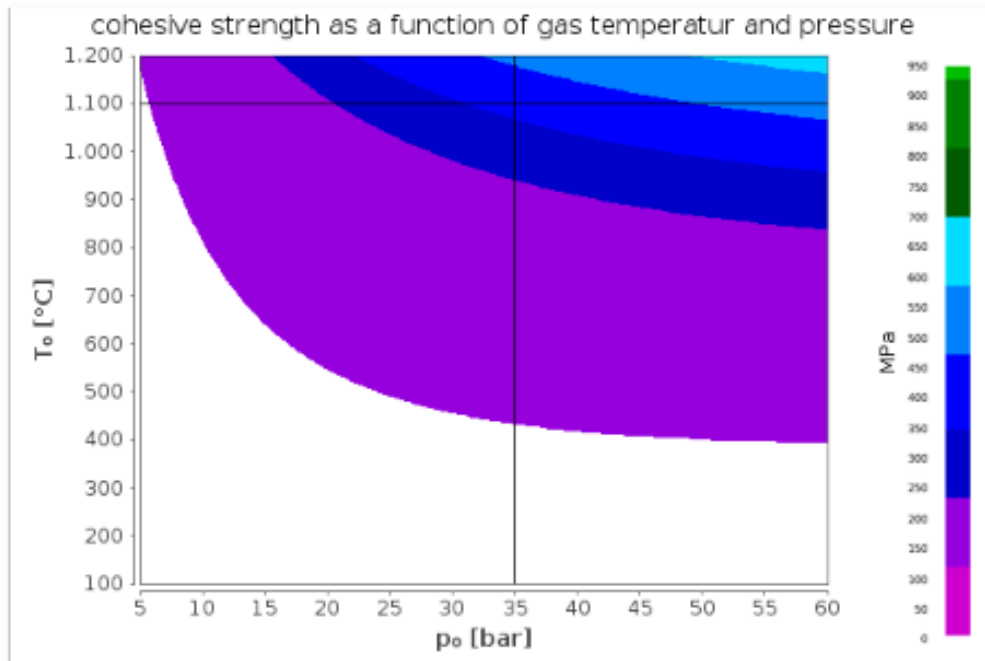


Figura 42. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 1000° y 35 bar.



Según los cálculos de PSM, se espera que el Rociado Térmico en Frío del polvo Inconel 625 con nitrógeno a 35 bar y 1100 ° C se asocie con una relación de velocidad inferior a 1.5, que resulta en una eficiencia de depósito del 99% y su resistencia cohesiva es de 380 MPa. Un aumento adicional en la relación de velocidad puede sugerirse a partir del aumento en la presión del gas de proceso como lo presenta en el Modelo 4(6A4).

### 3.4.4.4. Modelo 4(6A4)

Los cálculos obtenidos de PSM para el Modelo 4(6A4) (1100°C y 50 bar):

The screenshot shows the PSM software interface with the following parameters:

- Material: Inconel 625
- nozzle: OUT 1
- gas: Nitrogen
- consider particle size effect:
- gas temperature: 1100 °C (range 100 - 1200)
- gas pressure: 50 bar (range 5 - 60)
- particle diameter: 20 μm (range 1 - 150)

Figura 43. Variables del PSM (Mapa de Selección de Parámetros) utilizados en la simulación

calculated values (∅)					
vp	684 m/s	Tp	726 °C	v_crit	457 m/s
η	1.50	σ	472 MPa	DE	100 %
				mass load gas	0.7 %
				electric power consumption	49 kW

Figura 44. Resultados de acuerdo con las variables calculadas.

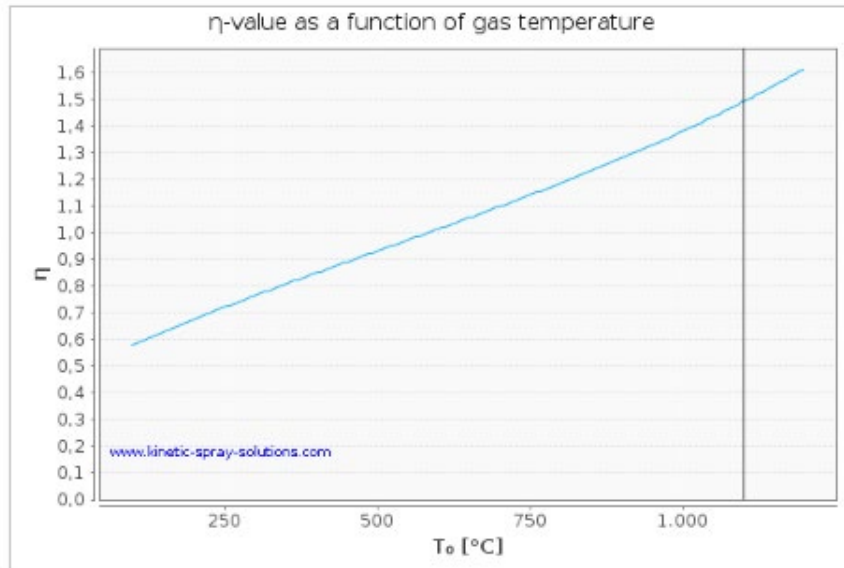


Figura 45. Resultados del valor  $\eta$  en función de la temperatura del gas.

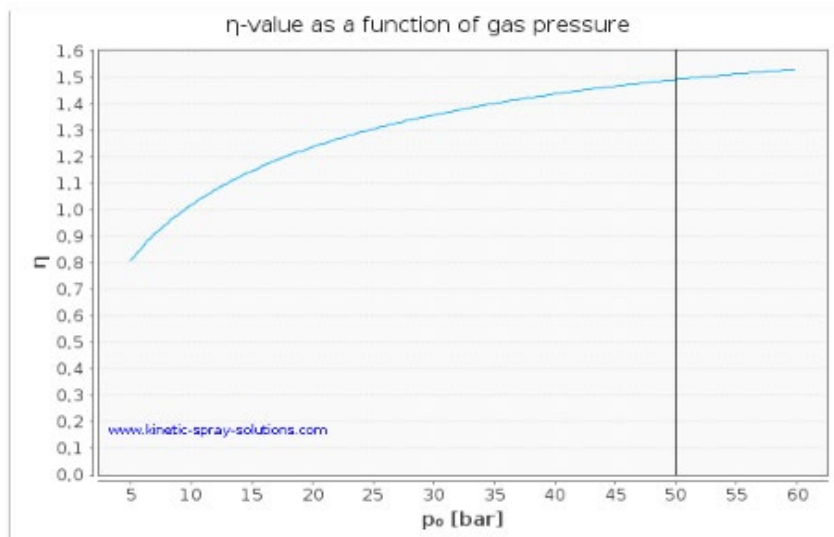


Figura 46. Resultados del valor  $\eta$  en función de la presión del gas

**equipment configuration** hide

equipment:

nozzle:

x start position powder injection:  m

stand-off distance:  m

**powder feeder** hide

powder feeder:

rotation feeder disk:  rpm

powder: Inconel 625 Inconel 625

D10: 20  $\mu\text{m}$     D50: 35  $\mu\text{m}$     D90: 40  $\mu\text{m}$

feedrate: 13.25g/min    0.80kg/h

**process gas parameter** hide

gas temperature:  °C

gas pressure:  bar

process gas 1:

volume flow rate gas: 88.1 Nm<sup>3</sup>/h

Figura 47. Configuración de la simulación a 900C y 35 bar de temperatura con la distribución de tamaño de partícula real del polvo utilizado.

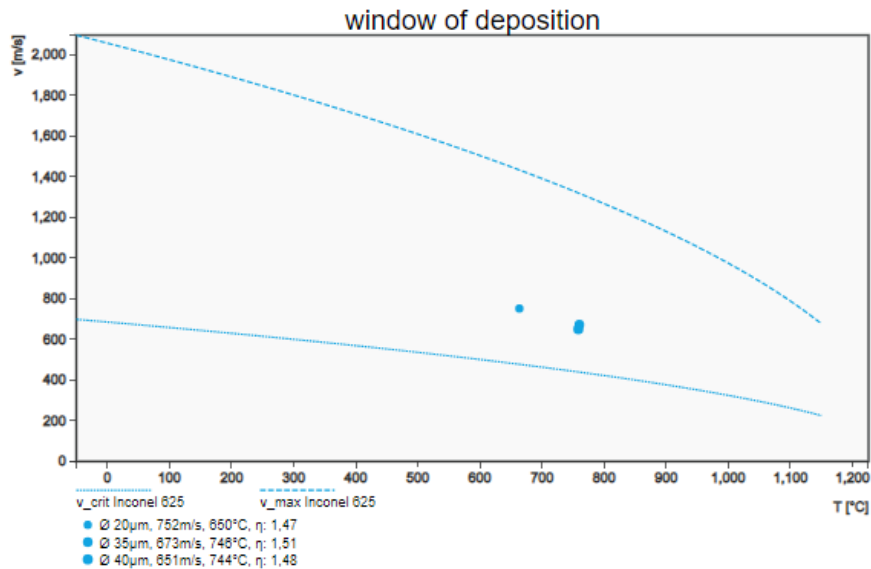


Figura 48. Resultados de la ventana de depósito utilizando la Distribución de Tamaño de Partícula del polvo utilizado.

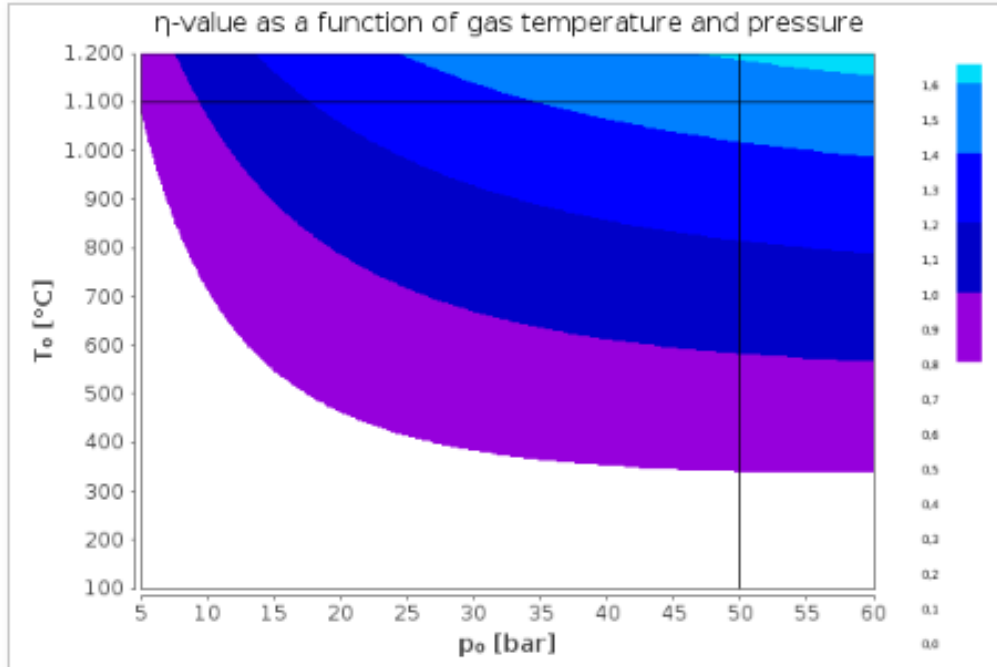


Figura 49. El Valor de  $\eta$  en función de la presión 35 Bar y la temperatura.

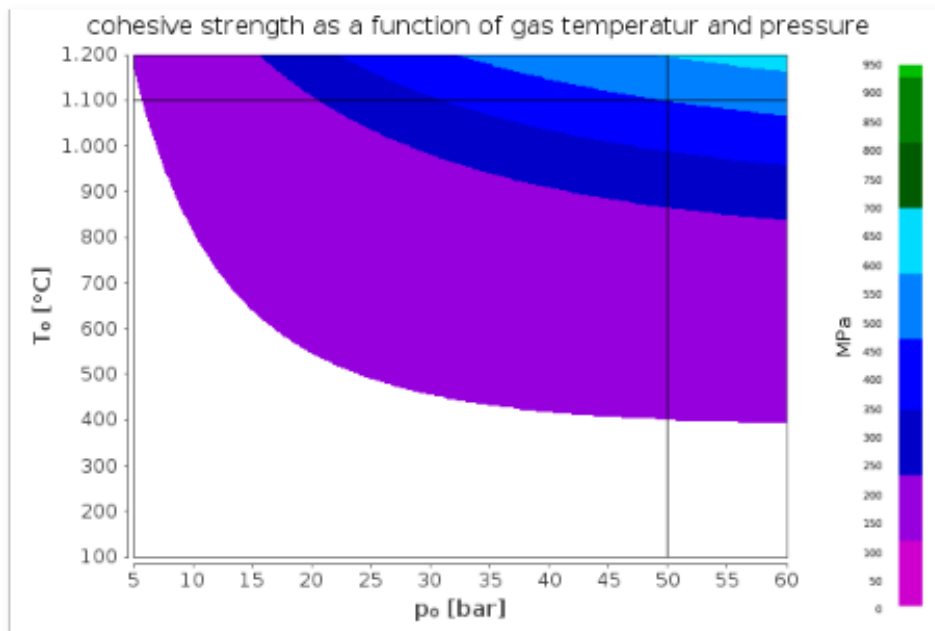


Figura 50. La resistencia cohesiva en función de la temperatura del gas 1100° y 35 bar.

Según los cálculos de PSM, se espera que el Rociado Térmico en Frío del polvo Inconel 625 con nitrógeno a 50 bar y 1100 ° C se asocie con una relación de velocidad es 1.5, que es que resulta en una eficiencia de depósito del 100% y su resistencia cohesiva es de 469 MPa. Se reitera que las condiciones que se presentan es el límite máximo de las condiciones de proceso del equipo y todos los datos considerados para su ejecución están considerados en la tabla 3.1 y 3.3

## 4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN UTILIZANDO EL PROCESO OPERATIVO HPCS

### 4.1. PARÁMETROS OPERATIVOS

Las etapas del proceso operativo que se deben realizar para llevar a cabo una aplicación de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión son:

1. Maquinado de superficie
2. Preparación superficial
3. Rociado Térmico en Frío a Alta Presión
4. Validación

### 4.2. IDENTIFICACIÓN Y TRAZABILIDAD DE LAS MUESTRAS

La validación se desarrolló de acuerdo con el diseño de pruebas que se muestra en la tabla 4.4. Se usaron 64 cupones, divididos en 4 juegos de 16 cada uno. Las variables seleccionadas para el Diseño de Pruebas de dos niveles fueron: presión de operación y temperatura de operación.

Tabla 4.1. Diseño de Pruebas para la validación del Rociado Térmico en Frío.

HPCS utilizando los 4 modelos definidos en la simulación			
		Presión	
		$p_{min}$ (35 Bar)	$p_{max}$ (50 Bar)
Temperatura	$T_{min}$ (900°C)	1 - 16 Modelo 1(6A1)	17 - 32 Modelo 2(6A2)
	$T_{max}$ (1100°C)	33 - 48 Modelo 3(6A3)	49 - 64 Modelo 4(6A4)

Los cupones rociados de acuerdo con el diseño de pruebas se caracterizaron con las diferentes pruebas mecánicas y metalúrgicas descritas en la tabla 4.3. DETERMINACION DE PROPIEDADES ADHESIVAS DEL RECUBRIMIENTO Y RESISTENCIA AL RAYADO.

### **4.3. METODOLOGÍA**

Se llevó a cabo una prueba de rasgado (scratch) a muestras contempladas en el apartado anterior. El rasgado fue lineal, con fuerza normal progresiva y de acuerdo con lo que se establece en el estándar ASTM G171.

#### **4.3.1. Equipo utilizado Scratch Tester RST3**

Se utilizan para medir características como la adhesión de un recubrimiento, los efectos de delaminación o el agrietamiento para optimizar las técnicas de recubrimiento y determinar los puntos de falla del sistema de película-sustrato.

El objetivo de un Scratch Tester es:

- Generar un rasgado controlado
- Cuantificar
  - Resistencia al rasgado
  - Propiedades adhesivas de la película sobre sustrato
  - Coeficiente de fricción
- Ser la herramienta para:
  - Investigación
  - Desarrollo
  - Control de calidad

La punta del diamante trazará sobre la superficie de hierro fundido recubierta con INCONEL 625 bajo una carga progresiva mientras la muestra se mueve a una VELOCIDAD CONSTANTE.

Los sensores miden durante la prueba:

- Emisión acústica
- Profundidad de penetración
- Fuerza potencial (fricción)

En cierta CARGA CRÍTICA, el recubrimiento comenzará a fallar

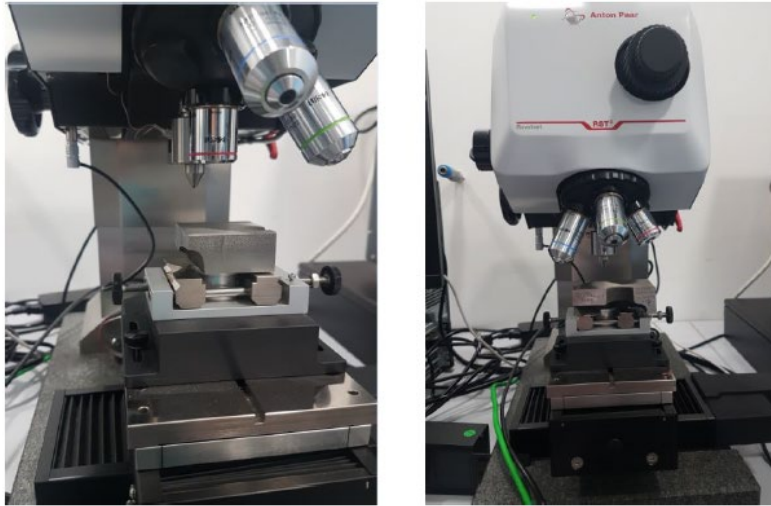
- Las cargas críticas se detectan mediante:
- Observaciones de un microscopio óptico incorporado
- Datos de emisión acústica (MST y RST)
- Datos de profundidad de penetración
- Datos de fuerza potencial

#### **4.3.1.1. Características del indentador**

- Tipo: Rockwell
- Número de serie: AP-214
- Material: Diamond
- Radius ( $\mu\text{m}$ ): 200
- Razón de carga (N/min): 199
- Escaneo de carga (N): 1
- Rapidez (mm/min): 1
- Longitud (mm): 1
- Tasa de adquisición: 30.0 [Hz]
- Número de análisis por muestra: 4



Figura 51. Scratch Tester RST3



### 4.3.2. Parámetros de la prueba de rasgado

Lineal Scratch  
 Tipo: Progresivo

Tabla 5.2. Pruebas definidas para los ensayos de rasgado lineales con cargas progresivas

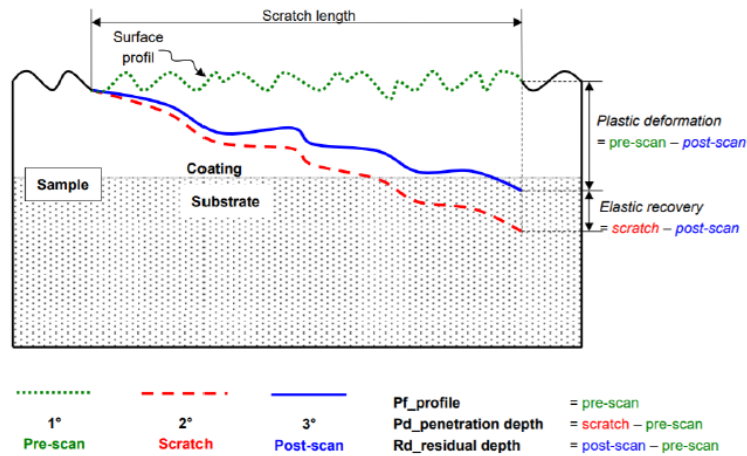
No. De Prueba	Inicio de Carga (N)	Fin de la carga (N)
P1. INCONEL 625 - Modelo 6A2	1	200
P2. INCONEL 625 - Modelo 6A2	1	10
P3. INCONEL 625 - Modelo 6A2	1	30
P4. INCONEL 625 - Modelo 6A2	1	50

#### Nomenclaturas:

- **Fn**= Fuerza Normal aplicada durante la prueba (N),
- **Ft**= Fuerza tangencial entre el indentador y la muestra (N),
- **μ**= Coeficiente de fricción entre el indentador y la muestra,

- **Ae**= Emisión acústica (%), Pd= Profundidad de penetración (durante el rasgado) ( $\mu\text{m}$ ),
- **Rd**= Profundidad residual (deformación plástica) ( $\mu\text{m}$ ),
- **Pf**= Perfil de la muestra ( $\mu\text{m}$ )
- 

Figura 52. Esquema de las secciones en Modo Pre- escáner, Scratch y Post- escáner. (US Patente 6,520,004 B1)



## CONCLUSIONES

El propósito principal de este proyecto desarrollado en conjunto con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Cummins en San Luis Potosí, fue alcanzado y completado, al poder desarrollar y validar un proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión (CSHP) en un recubrimiento Inconel 625 sobre un sustrato plano de hierro gris ASTM A48 soportado por un proceso de simulación que permitió a su vez, determinar si la tecnología es una opción factible a ser utilizada para realizar recubrimientos sobre superficies dañadas de hierro gris ASTM A48 por su previo uso.

El desarrollo del proyectó comprendió 3 importantes secciones:

1. Simulación de un proceso de Rociado Térmico en Frío
2. Desarrollo operativo requerido para procesar el recubrimiento Inconel 625
3. Validación de Modelos propuestos y el Análisis de resultados de estos.

Para cada una de las secciones existen conclusiones particulares que serán expuestas a continuación:

### **Simulación de un proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión**

Los procesos de simulación siempre permitirán adquirir experiencia de manera aparentemente rápida y a un bajo costo sin poner en riesgo las operaciones de un proceso como el propuesto para esta tesis. Sin embargo, para llegar a aproximaciones correctas y rápidas sobre los resultados que tendría un proceso real, se recomienda estudiar previamente a profundidad tres tópicos que serán los críticos para que la simulación sea exitosa:

1. La capacidad del equipo e integración de otros equipos periféricos a utilizar
  - a. Sistema de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión
    - i. Temperatura máxima operativa
    - ii. Presión mínima y máxima
    - iii. Tipo de suministro del gas a utilizar en el proceso

- iv. Cámaras de temperatura
- v. Tipo de pistola y boquillas
- 2. Los alcances de la Tecnología y sus usos
  - a. Tipos de materiales utilizados
  - b. Compatibilidad del material con el sustrato
  - c. Tamaño de partícula y calidad del polvo metálico.
- 3. El comportamiento de los materiales seleccionados a participar en el desarrollo.
  - a. Información técnica del polvo metálico como, propiedades mecánicas y química.
  - b. Propiedades mecánicas de sustrato a utilizar.

El desarrollo de un plan de trabajo y la administración que conlleva es necesaria para contar tomar decisiones apropiadas, tiempos reales y alcances específicos. Se observó a través de la simulación el impacto que tienen las variables operativas, que el incremento de presión y temperatura elevan el costo que representar el proceso y los tiempos de proceso mínimos para conseguir un resultado apropiado, así como su máxima eficiencia del proceso en función de las capacidades operativas.

La intención y decisión de elegir solo 2 variables críticas para el desarrollo de las pruebas estuvo vinculada directamente con la capacidad de la Tecnología y sus fundamentos teóricos, siendo así la presión la variable más importante en términos operativos para un proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión y la temperatura la influencia directa sobre el material elegido a depositar en un sustrato mejorando su nivel de la eficiencia del depósito al viajar a velocidades supersónicas y críticas.

### **Desarrollo operativo requerido para procesar el recubrimiento Inconel 625**

Desarrollar el proceso operativo de los modelos propuestos en la simulación requirió de un plan de trabajo donde se definió el seguimiento a los entregables para llevar a cabo el proceso en tiempo y de forma segura para el proyecto y el personal involucrado.

Los 4 Modelos simulados (Modelo 1(6A1), Modelo 2(6A2), Modelo 3(6A3), Modelo 4(6A4)) están alineados con los fundamentos teóricos de la Tecnología, sin embargo, solo los Modelos 1(6A1) y Modelo 2(6A2), cumplen con lo previamente planteado en la hipótesis de esta tesis al presentar resultados de áreas obtenidas con un recubrimiento de 1 mm de espesor similares a lo definido teóricamente.

Finalmente podemos concluir que al utilizar esta tecnología y su simulación del proceso tendremos una buena relación operativa siempre y cuando se respeten las condiciones de operación que establece el proveedor Líder de la Tecnología para obtener los mejores resultados y se conozca previamente el material y sus propiedades físicas y químicas a utilizar. La simulación es válida solo en polvos comerciales distribuidos para esta tecnología. En caso contrario, la simulación podría ayudar a acercarse a las condiciones experimentales ideales y que, como se vio en este trabajo, la simulación permite disminuir el número de experimentos. La selección de experimentos basada en simulación permite validar y encontrar una condición con las propiedades que se buscan según la aplicación deseada y además permite disminuir costos por la reducción del número de experimentos reales.

### **Validación de Modelos propuestos y el Análisis comparativo de resultados.**

La Validación y análisis de resultados de los modelos propuestos en esta tesis, el tipo de pruebas necesarias y su alcance para caracterizar una superficie procesada a través de un Proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión estuvo basada en:

1. Las pruebas y caracterizaciones recomendadas y definidas por los estándares internacionales de Pruebas de Materiales (ASM International y ASTM)
2. El máximo desempeño del recubrimiento reportado por el proveedor del polvo metálico.

Los resultados de todos los modelos fueron realizados y verificados con especialistas del ramo de Rociados Térmicos para concluir que la mejor combinación obtenida es la presentada en el Modelo 2(6A2) permitiendo que la partícula alcance su

mejor velocidad crítica bajo una presión de 50 bar y 900C mencionada por la simulación obtenida del Software KSS.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las caracterizaciones mecánicas, microestructurales y de desgaste podemos concluir que el proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión utilizado para crear un recubrimiento Inconel 625 sobre un sustrato plano de hierro gris sobrepasa las características regulares que tiene el sustrato haciéndolo un material ideal para reparar zonas de desgaste, haciéndolo compatible y como una opción económicamente factible.

## RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de la simulación y del desarrollo operativo en esta tesis son afectados directamente por todos los factores descritos en la tabla 2.1 del marco teórico. Para mantener una correlación lógica entre lo evaluado por el software de simulación y el sistema operativo, deben ser considerados los siguientes aspectos.

- 1.1. Los polvos comerciales seleccionados en el software deberán coincidir con la distribución de tamaño de partícula y el proveedor ya que el tipo de fabricación del polvo puede ser diferente y las condiciones de morfología y calidad afectan directamente sus propiedades mecánicas esperadas
- 1.2. EL tipo de gas a utilizar y la calidad de este.
- 1.3. El área del sustrato
- 1.4. La velocidad de alimentación del polvo.
- 1.5. Dado que la temperatura es un parámetro crítico para mejorar las condiciones de nuestro recubrimiento, el verificar que las condiciones del equipo para sean las adecuadas durante el proceso es un paso previo que debe contemplarse.
- 1.6. Los resultados de la simulación realizados en KSS consideran que las superficies donde la partícula es impactada es plana, por lo que el procesar geometrías con superficies diferentes utilizando los parámetros de la simulación pueden no ser coincidentes.

## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

Los resultados de la tesis fueron desarrollados como parte de un proceso del desarrollo de un Proyecto PPT que se realiza en las instalaciones del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Cummins. La investigación llevada a cabo permite establecer las bases teóricas y operativa, beneficiando directamente al Centro de Investigación y a otros sitios de la misma compañía que puedan consultar la información generada a través de los sitios de búsqueda de información técnica interna de la compañía. El Centro de Investigación podrá evaluar la factibilidad técnica de un proceso de Rociado Térmico en Frío a Alta Presión utilizando herramientas que le permitan realizar propuestas sólidas y sustentadas. Adicional, los resultados de esta tesis podrán orientar a evaluar aquellos proyectos Cummins que buscan soluciones a través del proceso de Rociado Térmico en Frío y de las áreas de Reman buscando oportunidades de negocios con reducción de costos en los materiales a ser utilizados para la reconstrucción de un componente que será utilizado en un motor ReCon.



## **APORTACION SOCIAL**

La investigación de esta tesis refuerza el compromiso con la Remanufactura de componentes de motores Cummins al buscar emplear esta tecnología en componentes de hierro gris al brindar los fundamentos teóricos y los parámetros del proceso operativo para el uso de esta tecnología. La Remanufactura de los componentes de hierro gris brinda la oportunidad de crear nuevos empleos, la reducción del impacto tecnológico, realizar productos con calidad y reduciendo los costos de fabricación o integración durante el ensamble de un motor Reman.

## REFERENCIAS

- [1] ASM specialty handbook: nickel, cobalt, and their alloys. (2001). Choice Reviews Online, 38(11), 38-6206-38-6206. <https://doi.org/10.5860/choice.38-6206>
- [2] Eiselstein, H. L., & Tillack, D. J. (2012). The Invention and Definition of Alloy 625 (pp. 1-14). The Minerals, Metals and Materials Society. [https://doi.org/10.7449/1991/superalloys\\_1991\\_1\\_14](https://doi.org/10.7449/1991/superalloys_1991_1_14)
- [3] Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V. M. (2007). Cold Spray Technology. Cold Spray Technology. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5>
- [4] Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. Acta Materialia, 51(15), 4379-4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
- [5] Hussain, T., McCartney, D. G., & Shipway, P. H. (2011). Impact phenomena in cold-spraying of titanium onto various ferrous alloys. Surface and Coatings Technology, 205(21-22), 5021-5027. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.003>
- [6] Bae, G., Kumar, S., Yoon, S., Kang, K., Na, H., Kim, H. J., & Lee, C. (2009). Bonding features and associated mechanisms in kinetic sprayed titanium coatings. Acta Materialia, 57(19), 5654-5666. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.061>
- [7] Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S., & Helfritsch, D. (2004). Adiabatic shear instability-based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. Materials and Design, 25(8), 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.008>
- [8] Assadi, H., Schmidt, T., Richter, H., Kliemann, J. O., Binder, K., Gärtner, F., ... Kreye, H. (2011, December). On parameter selection in cold spraying. Journal of Thermal Spray Technology. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9662-9>

- [9] Bae, G., Xiong, Y., Kumar, S., Kang, K., & Lee, C. (2008). General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings. *Acta Materialia*, 56(17), 4858–4868. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.06.003>
- [10] Goldbaum, D., Shockley, J. M., Chromik, R. R., Rezaeian, A., Yue, S., Legoux, J. G., & Irissou, E. (2012, March). The effect of deposition conditions on adhesion strength of Ti and Ti6Al4V cold spray splats. *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9720-3>
- [11] Gilmore, D. L., Dykhuizen, R. C., Neiser, R. A., Roemer, T. J., & Smith, M. F. (1999). Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 8(4), 576–582. <https://doi.org/10.1361/105996399770350278>
- [12] Dykhuizen, R. C., Smith, M. F., Gilmore, D. L., Neiser, R. A., Jiang, X., & Sampath, S. (1999). Impact of high velocity cold spray particles. *Journal of Thermal Spray Technology*, 8(4), 559–564. <https://doi.org/10.1361/105996399770350250>
- [13] King, P. C., Bae, G., Zahiri, S. H., Jahedi, M., & Lee, C. (2010). An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 19, pp. 620–634). <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9454-7>
- [14] Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*, 54(3), 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.005>
- [15] ISO/TR 14232-2 Thermal spraying – Powders-Part 2: Comparison of coating performance and spray powder chemistry, pp 7-15, Inconel 625, In625.
- [16] Handbook Of Thermal Spray Technology. Materials Park, OH: ASM International.
- [17] M, K. and J, K., 2016. High Pressure Cold Spray - Principles And Applications. [Place of publication not identified]: ASM International. [18] Luengo, O. (2008). Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP. *Memorias*, 1–

65. Retrieved from

[http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1774/01.MGB\\_INTRODUCCION.pdf](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1774/01.MGB_INTRODUCCION.pdf)

[19] KSS Kinetic Spray Solutions., Simulation in Gas Dynamic Cold Spraying, Kinetic-spray-solutions.com

[20] Gómez Botero, M. and Esteve Pujol, J., 2007. Caracterización De Las Propiedades Tribológicas De Los Recubrimientos Duros. Barcelona: Universitat de Barcelona.

[21] Arabgol, Z., Villa Vidaller, M., Assadi, H., Gärtner, F., & Klassen, T. (2017). Influence of thermal properties and temperature of substrate on the quality of cold-sprayed deposits. *Acta Materialia*, 127, 287–301. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.01.040>

[22] Pershin, V., Lufitha, M., Chandra, S., & Mostaghimi, J. (2003). Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 12(3), 370–376. <https://doi.org/10.1361/105996303770348249>

[23] Michaela KAŠPAROVÁ a, František ZAHÁLKA b, Šárka HOUDKOVÁ c. EVALUATION OF THE BOND STRENGTH OF THE THERMALLY SPRAYED COATINGS. Roznov pod Radhostem, Czech Republic, EU.

[24] Scrivani, A., Ianelli, S., Rossi, A., Groppetti, R., Casadei, F., & Rizzi, G. (2001). A contribution to the surface analysis and characterisation of HVOF coatings for petrochemical application. *Wear*, 250(1–12), 107–113. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00621-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00621-4)

[25] Pontarollo, A., Vezzù, S., Trentin, A., Rech, S., Guidolin, M., Cafissi, A., ... Molinas, B. (2011). Characterisation of Inconel 625 coatings deposited by cold spray. In *International Thermal Spray Conference*.

[26] Tuominen J., Vuoristo P., Mäntylä T., Kylmälahti M., Vihinen J., Andersson P.H. Improving corrosion properties of high-velocity oxy-fuel sprayed inconel 625 by using a high-power continuous wave neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser. *JTST*. 9 (4), pp. 513–519, IN alloy 625.

[27] Al-Fadhli. (2006). Analysis of the Effect of Bending, Fatigue, Erosion-Corrosion and Tensile Stresses on HVOF Coating of Metallic Surfaces. PhD, Dublin City University, Ireland, (March).

[28] Kawahara, Y. (2007, June). Application of high temperature corrosion-resistant materials and coatings under severe corrosive environment in waste-to-energy boilers. *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-006-9012-5>

[29] Tuominen J., Vuoristo P., Mäntylä T., Kylmälahti M., Vihinen J., Andersson P.H. Properties of Nickel Superalloy Coatings As-Sprayed and with Nd-YAG Laser Remelting, *Thermal Spray 2000: Surface Engineering via Applied Research* (ASM International), pp. 588–596, Inconel625.

[30] Wang, F. F., Li, W. Y., Yu, M., & Liao, H. L. (2014). Prediction of critical velocity during cold spraying based on a coupled thermomechanical eulerian model. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 23, pp. 60–67). <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0009-6>

[31] H. Assadi, T. Schmidt, F. Gärtner, H. Kreye, Characteristics of particle bonding and material deposition in cold spraying, in: M. Jahazi, M. Elboujdaini, P. Patnaik (Eds.), *Proc. of Aerospace Materials and Manufacturing Processes: Emerging Materials, Processes, and Repair Techniques*, Canada, Montreal, October 2006, pp. 49e59. COM 2006, 1e4..

[32] Suo, X. K., Guo, X. P., Li, W. Y., Planche, M. P., & Liao, H. L. (2012, September). Investigation of deposition behavior of cold-sprayed magnesium coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9777-7>

[33] Ghelichi, R., Bagherifard, S., Guagliano, M., & Verani, M. (2011). Numerical simulation of cold spray coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(23–24), 5294–5301. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.038>

[34] Raletz, F., Vardelle, M., & Ezo'o, G. (2006). Critical particle velocity under cold spray conditions. *Surface and Coatings Technology*, 201(5), 1942–1947. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.061>

[35] Grujicic, M., Zhao, C. L., Tong, C., DeRosset, W. S., & Helfritch, D. (2004). Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Science and Engineering A*, 368(1–2), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.312>

[36] Dykhuizen, R. C., & Smith, M. F. (1998). Gas Dynamic Principles of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 7(2), 205–212. <https://doi.org/10.1361/105996398770350945>

[37] Christoulis, D. K., Guetta, S., Guipont, V., & Jeandin, M. (2011, March). The influence of the substrate on the deposition of cold-sprayed titanium: An experimental and numerical study. *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9608-7>

[38] Vidaller, M. V., List, A., Gaertner, F., Klassen, T., Dosta, S., & Guilemany, J. M. (2015). Single Impact Bonding of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Powders on Different Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(4), 644–658. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0200-4>

[39] Manap, A., Nooririnah, O., Misran, H., Okabe, T., & Ogawa, K. (2014). Experimental and SPH study of cold spray impact between similar and dissimilar metals. *Surface Engineering*, 30(5), 335–341. <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000237>

[40] Yin, S., Suo, X., Su, J., Guo, Z., Liao, H., & Wang, X. (2014). Effects of substrate hardness and spray angle on the deposition behavior of cold-sprayed ti particles. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 23, pp. 76–83). <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0039-0>

[41] Drehmann, R., Grund, T., Lampke, T., Wielage, B., Manygoats, K., Schucknecht, T., & Rafaja, D. (2014). Splat formation and adhesion mechanisms of cold gas-sprayed al coatings on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 23, pp. 68–75). <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9966-z>

[42] Fukumoto, M., Wada, H., Tanabe, K., Yamada, M., Yamaguchi, E., Niwa, A., ... Izawa, M. (2007). Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper

particles on substrate surfaces in the cold spray process. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 16, pp. 643–650). <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9121-9>

[43] Laurila J., Niemi K., Vuoristo P., Vajala J. Corrosion and wear resistance of molybdenum containing arc spray composite coatings, *Thermal Spray 2011: Proceedings of the International Thermal Spray Conference (DVS-ASM)*, pp. 1151–1156, SM8625, Inconel625, SM8276, Hastelloy276, Deloro Stellite21, Mo wire.

[44] Marrocco T., Harvey D., Hussain T. Characterisation of Corrosion Resistant Deposits by Cold Gas Dynamic Spray, *International Thermal Spray Conference & Exposition 2010, Thermal Spray: Global Solutions for Future Application (DVS-ASM)*, pp. 482–486, Alloy 625.

[45] Tuominen, J., Vuoristo, P., Mäntylä, T., Kylmälahti, M., Vihinen, J., & Andersson, P. H. (2000). Improving corrosion properties of high-velocity oxy-fuel sprayed Inconel 625 by using a high-power continuous wave neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser. *Journal of Thermal Spray Technology*, 9(4), 513–519. <https://doi.org/10.1361/105996300770349737>

[46] Moore, D. F., & Booker, J. F. (1976). Principles and Applications of Tribology. *Journal of Lubrication Technology*, 98(4), 635–635. <https://doi.org/10.1115/1.3452952>

[47] Klassen, T., Gärtner, F., Schmidt, T., Kliemann, J. O., Onizawa, K., Donner, K. R., ... Kreye, H. (2010). Basic principles and application potentials of cold gas spraying. In *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (Vol. 41, pp. 575–584). <https://doi.org/10.1002/mawe.201000645>

[48] Hussain, T. (2013). Cold spraying of titanium: A review of bonding mechanisms, microstructure and properties. *Key Engineering Materials*, 533, 53–90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.533.53s>.

[49] Li, W. Y., Zhang, D. D., Huang, C. J., Yin, S., Yu, M., Wang, F. F., & Liao, H. L. (2014). Modelling of impact behaviour of cold spray particles: Review. *Surface Engineering*, 30(5), 299–308. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000268>

[50] Imbriglio, S. I., Hassani-Gangaraj, M., Veysset, D., Aghasibeig, M., Gauvin, R., Nelson, K. A., ... Chromik, R. R. (2019). Adhesion strength of titanium particles to alumina substrates: A combined cold spray and LIPIT study. *Surface and Coatings Technology*, 361, 403–412. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.071>

[51] Champagne, V. K. (2007). The cold spray materials deposition process: Fundamentals and applications. *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications* (pp. 1–362). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781845693787>

[52] Góral, A., Zórawski, W., Czaja, P., Litynska-Dobrzynska, L., Makrenek, M., & Kowalski, S. (2019). Effect of powder morphology on the microstructure and properties of cold sprayed Ni coatings. *International Journal of Materials Research*, 110(1), 49–59. <https://doi.org/10.3139/146.111698>

[53] Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition (pp. 1–626). John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470754085>

[54] Wang, X., Feng, F., Klecka, M. A., Mordasky, M. D., Garofano, J. K., El-Wardany, T., ... Champagne, V. K. (2015). Characterization and modeling of the bonding process in cold spray additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 8, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.03.006>

[55] Nastic, A., Vijay, M., Tieu, A., Rahmati, S., & Jodoin, B. (2017). Experimental and Numerical Study of the Influence of Substrate Surface Preparation on Adhesion Mechanisms of Aluminum Cold Spray Coatings on 300M Steel Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(7), 1461–1483. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0602-1>

[56] Fauchais, P., Montavon, G., & Bertrand, G. (2010). From powders to thermally sprayed coatings. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 19, pp. 56–80). <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9435-x>



[57] Estudio de desgaste de láminas de acero deformadas con herramientas recubiertas. (2014). *Scientia Et Technica*, 19(4), 433–437. <https://doi.org/10.22517/23447214.9324>

[58] Arias, S., Castaño, J. G., Correa, E., Echeverría, F., & Gómez, M. (2019). Effect of Heat Treatment on Tribological Properties of Ni-B Coatings on Low Carbon Steel: Wear Maps and Wear Mechanisms. *Journal of Tribology*, 141(9). <https://doi.org/10.1115/1.4043906>

[59] Mattox, D. M., & Sequeda, F. (2020). CIENCIA DE LOS MATERIALES. In Guías educativas para el procesamiento, caracterización y aplicaciones de recubrimientos-capas delgadas (pp. 43–68). Programa Editorial Universidad del Valle. <https://doi.org/10.2307/j.ctv10vm0nt.5>

[61] Sundararajan, G., Chavan, N. M., Sivakumar, G., & Sudharshan Phani, P. (2010). Evaluation of parameters for assessment of inter-splat bond strength in cold-sprayed coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19(6), 1255–1266. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9527-7>

[62] Liu, Z., Cabrero, J., Niang, S., & Al-Taha, Z. Y. (2007). Improving corrosion and wear performance of HVOF-sprayed Inconel 625 and WC-Inconel 625 coatings by high power diode laser treatments. *Surface and Coatings Technology*, 201(16–17), 7149–7158. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.032>

[63] 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), 2006, p 729–742.

[64] T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H.J. Richter, An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, Vol 11 (No. 4), 2002, p 542–550. <https://doi.org/10.1361/105996302770348682>

[65] Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F. et al. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *J Therm Spray Tech* 18, 794 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7>

[66] T. Stoltenhoff, "Kaltgasspritzen von Kupfer – Eine strömungsmechanische und werkstoffkundliche Analyse und Optimierung des Spritzprozesses," Ph.D. Thesis, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, 2003, Shaker Verlag, Aachen, Germany, 2004. ISBN 3-8322-2302-9