

EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE
PROYECCIÓN EN LAS PROPIEDADES TERMOCINÉTICAS DE LAS PARTÍCULAS EN
VUELO EN LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN TÉRMICA VÍA PLASMA USANDO ANSYS
FLUENT

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de magíster en Física
Aplicada

Ing. Alejandro Álvarez Uribe

PhD. Claudia Constanza Palacio Espinosa

Directora

PhD. Juan Manuel Rodríguez Prieto

Codirector

PhD. Alejandro Marulanda Tobón

Codirector

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA

UNIVERSIDAD EAFIT

SEDE MEDELLÍN

2023

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	8
AGRADECIMIENTOS	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	15
4.1. Estado del arte	15
4.2. Marco teórico	25
5. OBJETIVOS	34
5.1. Objetivo general	34
5.2. Objetivos específicos.....	34
6. METODOLOGÍA.....	35
6.1. Etapa 1: Simulación CFD.....	36
6.2. Etapa 2: Construcción del modelo de correlación.....	41
6.3. Etapa 3: Validación experimental	44
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
7.1. Resultados de la construcción del modelo CFD.	55
7.2. Resultados de los modelos de correlación de variables.	59
7.3. Resultados de la validación experimental.....	64
8. CONCLUSIONES	75
9. PERSPECTIVAS/TRABAJO FUTURO	77
10. REFERENCIAS	78

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Esquema general de un proceso de proyección térmica [5].	15
Figura 2: Clasificación de las tecnologías utilizadas en proyección térmica según la naturaleza de la fuente de energía térmica [5].	16
Figura 3: Esquema general de la formación de un recubrimiento elaborado por proyección térmica vía plasma.	17
Figura 4: Configuración estándar de una antorcha de plasma: (1) ánodo, (2) cátodo, (3) conector de salida de agua y cátodo, (4) entrada de agua y conector de ánodo, (5) entrada para gases de trabajo, (6) inyector de polvo, (7) aislante eléctrico, (8) boquilla [10].	18
Figura 5. Comportamiento de la temperatura y velocidad del jet de plasma en diferentes ubicaciones dentro del mismo:	19
Figura 6: Metodología de trabajo para CFD propuesto por Hajdukiewicz [28].	24
Figura 7. Interacción entre una partícula y el sustrato [8].	31
Figura 8. Morfología de un <i>splat</i> producido en el impacto de una partícula líquida de YSZ (ZrO_2 estabilizada con Y_2O_3) sobre un sustrato liso: (a) <i>splat</i> en forma de salpicadura, (b) <i>splat</i> bien formado en forma de disco [1].	32
Figura 9: Diagrama de etapas del diseño metodológico.	36
Figura 10: Diseño metodológico de la etapa 1.	37
Figura 11: Diagrama de cajas para el protocolo de simulación.	38
Figura 12: (a) Interfaz de Jets et Poudres; (b) perfil térmico del jet de plasma.	38
Figura 13: a) vista angular del dominio de simulación b) vista frontal del dominio de simulación.	39
Figura 14: Distribución de tamaño de partícula del polvo de validación Metco 204 NS-G para validar el primer conjunto de simulaciones.	45
Figura 15: Interfaz de usuario del software visible en el computador.	47

Figura 16: Imagen con microscopía electrónica de barrido del polvo Metco 204NS usado en las etapas 2 y 3 de este informe.....	51
Figura 17: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E1.....	52
Figura 18: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E2.....	52
Figura 19: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E3.....	52
Figura 20: Sección transversal de un recubrimiento luego del proceso digital para la medición de la porosidad.....	54
Figura 21: Perfil térmico del jet de plasma a 37300 W en Jets et Poudres.....	55
Figura 22: Perfil cinético del jet de plasma a 37300 W en Jets et Poudres.....	56
Figura 23: Perfil térmico del jet de plasma en una proyección a 37300 W de operación obtenido mediante ANSYS Fluent.....	57
Figura 24: Perfil cinético del jet de plasma en una proyección a 37300 W de operación obtenido mediante ANSYS Fluent.....	57
Figura 25: Trayectoria y perfil térmico de las partículas de 55 μm de diámetro obtenido mediante ANSYS Fluent.....	58
Figura 26: Trayectoria y perfil cinético de las partículas de 55 μm de diámetro obtenido mediante ANSYS Fluent.....	58
Figura 27: Dependencia de la temperatura y velocidad del jet de plasma frente a la potencia de la antorcha obtenida mediante Jets et Poudres.....	60
Figura 28: Relación entre el tamaño de las partículas (TaP) con su temperatura (Tp) y velocidad (Vp) obtenidas mediante ANSYS Fluent.....	63
Figura 29: Relación entre la potencia de la antorcha con la Temperatura de las partículas en el plano de proyección obtenida teóricamente mediante ANSYS Fluent y experimentalmente mediante los sensores AccuraSpray.....	66
Figura 30: Relación entre la potencia de la antorcha con la velocidad de las partículas en el plano de proyección obtenida teóricamente mediante ANSYS Fluent y experimentalmente mediante los sensores Accuraspray.....	66

Figura 31: Vista superior de la muestra E1 a 2000X.....	70
Figura 32: Perfil superior de la muestra E2 a 2000X.....	71
Figura 33: Perfil superior de la muestra E3 a 2000X.....	72
Figura 34: Curva de calibración para el cálculo de dureza de las muestras E1, E2 y E3.	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Condiciones de operación de la antorcha SimplexPro.....	35
Tabla 2: Diseño experimental para simulaciones variando la potencia de la antorcha.....	43
Tabla 3: Diseño experimental para simulaciones variando el tamaño de partícula inyectado.	44
Tabla 4: Datos a recolectar en el primer conjunto de simulaciones para validación experimental.	49
Tabla 5: Parámetros de proyección para la verificación del segundo conjunto de simulaciones.	51
Tabla 6: Resultados teóricos de las simulaciones sobre el primer conjunto de muestras.....	61
Tabla 7: Resultados del segundo conjunto de simulaciones.....	62
Tabla 8: Resultados teóricos y experimentales de la validación del primer conjunto de muestras.	65
Tabla 9: Análisis de significancia para los coeficientes.	68
Tabla 10: Análisis de error cuadrático medio para los modelos teóricos obtenidos mediante ANSYS Fluent.	69
Tabla 11: Resultados de porosidad en la sección transversal de las muestras E1, E2 y E3.....	72
Tabla 12: Resultados de la caracterización de dureza transversal para las muestras E1, E2 y E3.	74

LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

- APS: Atmospheric Plasma Spray
- YSZ: Yttria Stabilized Zirconia
- CVD: Chemical Vapor Deposition
- PVD: Physical Vapor Deposition
- HVOF: High Velocity Oxygen Fuel
- ρ_p : Densidad de la partícula
- V_p : Velocidad de la partícula
- T_p : Temperatura de la partícula
- V_g : Velocidad del gas plasmógeno
- T_g : Temperatura del gas plasmógeno
- K : Número de Sommerfeld
- d_p : Diámetro de la partícula
- Re: Número de Reynolds
- Pr: Número de Prandtl
- c_p : Capacidad calórica del gas
- K_g : Conductividad térmica de la mezcla de gases
- μ_g : Viscosidad molecular de la mezcla de gases
- Nu : Número de Nusselt
- Bi : Número de Biot
- ϵ_p : Coeficiente de radiación
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann
- AHF: Ability Heat Factor
- DMF: Difficulty Melting Factor
- We: Número de Webber
- H_b : Calor latente de vaporización
- Q_n : Flujo térmico total
- L_m : Calor latente de fusión

RESUMEN

La técnica de fabricación de recubrimientos usando proyección térmica por plasma atmosférico o APS por sus siglas en inglés de *Atmospheric Plasma Spray*, ha sido un método de modificación superficial ampliamente utilizado en los últimos 50 años debido a su capacidad para alcanzar altas temperaturas, lo que puede garantizar la fundición de materiales cerámicos y permite obtener recubrimientos para piezas que son sometidas a condiciones extremas.

En este trabajo, a partir del estudio del estado del arte de la técnica de elaboración de recubrimientos por APS, se desarrolla un protocolo de simulación computacional, usando dos softwares comerciales, para analizar la influencia de parámetros de entrada en el proceso de proyección de las partículas, tales como la potencia de la antorcha y el tamaño de las partículas inyectadas, con el propósito de estudiar el perfil termocinético (temperatura y velocidad) de las partículas al llegar al plano de proyección donde se encuentra el sustrato.

De acuerdo con las simulaciones, las variaciones de temperaturas y velocidades que se consiguen al operar la antorcha en valores que cubren todo su rango de potencias es de 107K (3.5 %) y 16 m/s (8 %), respectivamente. Esto sugiere que, si se desea generar cambios representativos en propiedades microestructurales dependientes de estos parámetros de la partícula, como la porosidad y la dureza, la variación de potencia no es un método recomendado.

Como alternativa, se propone controlar el tamaño de partícula inyectado al jet de plasma, puesto que, los resultados de las simulaciones evidenciaron una fuerte correlación entre las características termocinéticas de las partículas y sus diámetros, dado que el comportamiento observado en partículas de 40 μm de diámetro es que llegan al sustrato con 4000K y 180 m/s de temperatura y velocidad, respectivamente, mientras que aquellas de 80 μm pueden alcanzar los 3000K y 125 m/s.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primera instancia a mis padres, mi hermana y mi familia, quienes me han enseñado el valor del trabajo, el esfuerzo y la dedicación para alcanzar mis sueños. Gracias por apoyarme siempre y nunca dejarme caer. Son mi ejemplo a seguir.

A mi asesora Claudia Palacio Espinosa por su apoyo y confianza a lo largo de este trayecto; gracias a su motivación y ejemplo pude culminar con éxito este gran proyecto. A mis co-asesores Juan Manuel Rodríguez y Alejandro Marulanda-Tobón por su invaluable aporte a este trabajo, cada conversación y concepto que me regalaron fue fundamental para alcanzar nuestros objetivos.

A Juan Camilo Arango y Andrés Felipe Mejía por todo ser grandes compañeros, amigos y por todo el conocimiento compartido a lo largo de estos años.

Agradezco a la Universidad EAFIT, a Empresas Públicas de Medellín (EPM), Universidad de Antioquia y Universidad Nacional por facilitar el acceso a los materiales, infraestructura y conocimiento que permitieron la realización de este trabajo de grado.

A mi esposa por acompañarme de la mano en este camino, ayudarme a crecer cada día, como ser humano y como profesional, invitarme a nunca dejar de soñar y ser mi motor, fuerza e inspiración.

1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos superficiales se han utilizado para proporcionar resistencia a la corrosión, al desgaste y a la fatiga, así como para prolongar las propiedades eléctricas, ópticas y/o térmicas de los materiales del sustrato. Las técnicas para generar recubrimientos incluyen el electroplatinado, los tratamientos químicos, el revestimiento por inmersión en caliente, la deposición química en fase vapor (CVD por sus siglas en inglés de *Chemical Vapor Deposition*), la deposición física en fase vapor (PVD, misma razón), la deposición por láser pulsado y la proyección térmica (vía combustión y arco eléctrico).

Dentro de la última categoría se encuentra la proyección térmica vía plasma. Esta es una técnica de recubrimiento en la cual un material se inyecta en un jet de plasma de alta velocidad y temperatura para alcanzar su punto de fusión y formar revestimientos sobre diferentes tipos de sustratos. Este método ha sido usado satisfactoriamente para recubrir turbinas de gas, fuselajes, motores, trenes de transmisión y chips de silicio, entre otros [1], [2].

Investigaciones tanto experimentales como teóricas [3], [4] han demostrado que las propiedades de los recubrimientos, como la dureza, porosidad, la rugosidad, etc., dependen de las características de las partículas, su comportamiento en vuelo, su impacto con el sustrato, así como de la preparación de éste. El tamaño, la velocidad, la temperatura de las partículas y su estado de fundición afectan a la calidad del recubrimiento, lo que plantea la necesidad de conocer y controlar estos parámetros para obtener calidades óptimas en el producto final.

El proceso APS tiene un gran número de parámetros en su funcionamiento, como el polvo a proyectar, la ubicación y distancia de proyección (distancia desde la antorcha y el punto de inyección de las partículas, respecto al sustrato), el voltaje aplicado entre ánodo y cátodo de la antorcha, la velocidad y tasa de inyección de polvo, la geometría y eficiencia de la antorcha, los gases plasmógenos y la preparación de la superficie del sustrato. La realización de pruebas experimentales para cuantificar la dependencia de la calidad del recubrimiento respecto de cada parámetro operativo es una tarea altamente compleja y costosa. Una alternativa viable para esto es utilizar softwares que permitan realizar estudios numéricos para explorar una amplia gama de parámetros de entrada y a los que se puede acceder experimentalmente para validaciones.

A través de este tipo de herramientas es posible investigar y conocer las propiedades termocinéticas de partículas en vuelo y su dependencia de los distintos parámetros de proyección contribuyendo a comprender comportamientos como la transferencia de calor y de momentum, la aparición y localización de turbulencias, combinación de gases y formación de recubrimientos los cuales son de alta complejidad si se quiere resolver analíticamente.

Con el objetivo de estudiar computacionalmente la forma en que los parámetros de proyección afectan las propiedades termocinéticas de las partículas en vuelo, en este trabajo se desarrolla e implementa un protocolo de simulación usando los softwares comerciales *Jets et Poudres* y *ANSYS Fluent*. El primero es un programa desarrollado por la Universidad de Limoges en el año 2004, el cual facilita la obtención de datos termocinéticos de los gases plasmógenos al proporcionar información de su composición gaseosa y la potencia de la antorcha. Por su parte, ANSYS Fluent es un módulo de simulación fluidodinámica que permite emular el proceso APS teniendo control sobre distintos parámetros de proyección y evaluando el recorrido de las partículas desde que salen del inyector hasta llegar al sustrato. La implementación del protocolo de simulación permite obtener resultados que evidencian la incidencia de la potencia de la antorcha y el tamaño de las partículas proyectadas sobre su velocidad y temperatura tanto en el recorrido como en el plano de proyección. Adicionalmente, la realización de pruebas experimentales conduce a validar el funcionamiento de las simulaciones. Por último, los análisis microestructurales de porosidad y microdureza realizados sobre los recubrimientos elaborados, permiten establecer relaciones entre las condiciones de vuelo de las partículas durante el proceso de proyección y los parámetros del jet de plasma que pilotan el proceso de proyección y la calidad de los recubrimientos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La proyección térmica comprende un grupo de técnicas de recubrimiento en donde materiales metálicos o no-metálicos son depositados de manera fundida o semi fundida para formar un recubrimiento. Estas técnicas están divididas en dos grupos: las técnicas que generan la energía por medio de combustión (reacción química) y las que generan la energía por medio de descargas eléctricas (como la de plasma atmosférico o APS) [5]. Cada una de estas técnicas posee temperaturas, velocidades y materias primas diferentes, lo cual las hace aptas para gran variedad de procesos y aplicaciones, pero al mismo tiempo la calidad de los recubrimientos que se logre obtener tendrá relación directa con las condiciones de proyección empleadas para su fabricación. La evaluación de parámetros de proyección, en relación con las posibles características de los productos finales, constituye múltiples escenarios posibles de fabricación de recubrimientos que se hacen imposibles de evaluar a través de valoraciones netamente experimentales, razón por la cual se hace necesario recurrir al modelado físico y matemático de los procesos asociados a través de la realización de simulaciones computacionales. Mediante este tipo de herramientas es posible identificar las velocidades y temperaturas que adquieren las partículas del material proyectado mientras están en vuelo y anticipar las condiciones de llegada al sustrato al completar el recorrido de la distancia de proyección, de modo que se pueden intervenir las condiciones de proyección para inducir cambios microestructurales en el recubrimiento final.

Con base en lo anterior, se establece la siguiente pregunta de investigación del proyecto: ¿Es posible correlacionar los parámetros de proyección de la técnica APS con las propiedades termocinéticas de las partículas en vuelo analizadas mediante el software *ANSYS Fluent* y su influencia en las propiedades microestructurales de recubrimientos, tales como porosidad y microdureza?

3. JUSTIFICACIÓN

El valor del mercado global de recubrimientos por proyección térmica ascendió a 7.6 mil millones de dólares en 2020, y se espera que supere los 10.7 mil millones de dólares para el año 2025 [6]. De este mercado, el 60 % de los recubrimientos son consumidos por la industria aeroespacial y de generación termoeléctrica, mientras que el 40 % restante se distribuye entre varias industrias, incluyendo petróleo y gas, biomédica, papel, celulosa y electrónica, entre otras [7]. Dentro de esta técnica, los materiales más utilizados para realizar recubrimientos son los cerámicos debido a su facilidad de acceso y relación costo-beneficio [6].

Sin embargo, la implementación industrial de estas técnicas en Colombia presenta importantes desafíos técnicos e infraestructurales, así como la disponibilidad de recursos económicos y la necesidad de una mayor transferencia de conocimiento en nuestro país. La aplicación a gran escala de estas técnicas presenta un gran reto en la capacidad de garantizar la calidad adecuada de los recubrimientos para satisfacer las diversas aplicaciones requeridas. Por lo tanto, es crucial comprender los parámetros que pueden afectar los procesos de proyección y comprender los fenómenos físicos involucrados en el proceso puesto que de esta manera es posible reducir los costos propios de la experimentación optimizándola a tal punto de minimizar pérdidas de energía, materiales, y tiempo que al final se traducen en ahorro económico y mejoras en calidad de recubrimientos.

Para optimizar procesos de proyección térmica se han desarrollado diferentes simulaciones a partir de software comerciales como lo son como *Phoenixs*, *Jets et Poudres*, *ANSYS Fluent* o *COMSOL Multiphysics*, entre otros. De estos se destacan *ANSYS Fluent* y *Jets et Poudres* en la rama de proyección térmica vía plasma gracias a la versatilidad al momento de variar parámetros, lo que brinda la posibilidad al usuario de adaptar de manera efectiva la simulación al experimento real, obteniendo así resultados fieles al fenómeno a partir de capacidades de cómputo propias asequibles a nivel investigativo para la industria colombiana.

De esta manera, si se combina un mercado en constante crecimiento alrededor del mundo, una necesidad de optimización de un proceso con miras a una reducción de costos y las herramientas computacionales adecuadas para realizar simulaciones que permitan realizar estas optimizaciones,

el resultado es una oportunidad de investigación en este tema que concluya en un avance para la técnica de proyección térmica vía plasma y un paso más para la industria colombiana.

4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1. Estado del arte

La proyección térmica es un conjunto de técnicas que comenzaron su desarrollo a inicios del siglo XX por M.U Schoop, quien elaboró recubrimientos de zinc utilizando la técnica de proyección por llama oxiacetilénica [8]. Sin embargo, no fue hasta mediados de este siglo cuando estas tecnologías empezaron su verdadero desarrollo gracias a la necesidad creada por la industria aeroespacial de explorar nuevos materiales y la aparición de nuevas tecnologías como la proyección por plasma de arco eléctrico [9].

Este grupo de técnicas de recubrimiento se utiliza para depositar materiales metálicos o no-metálicos de manera fundida o semi fundida con la idea formar un recubrimiento y las cuales están divididas en dos grandes grupos: las técnicas que generan la energía por medio de combustión (reacción química) y las que generan la energía por medio de descargas eléctricas [10]. Un esquema que describe el concepto general, desde el punto de vista energético, de las técnicas de proyección térmica, se muestra en la Figura 1. El elemento central de todo proceso de proyección se basa en el uso de una antorcha que convierte la energía suministrada (energía química en el caso de combustión, energía eléctrica en el caso del plasma) en un jet o pluma de calor concentrado por el cual deben pasar los materiales para ser fundidos o semi fundidos y formar el recubrimiento al llegar al sustrato [11].

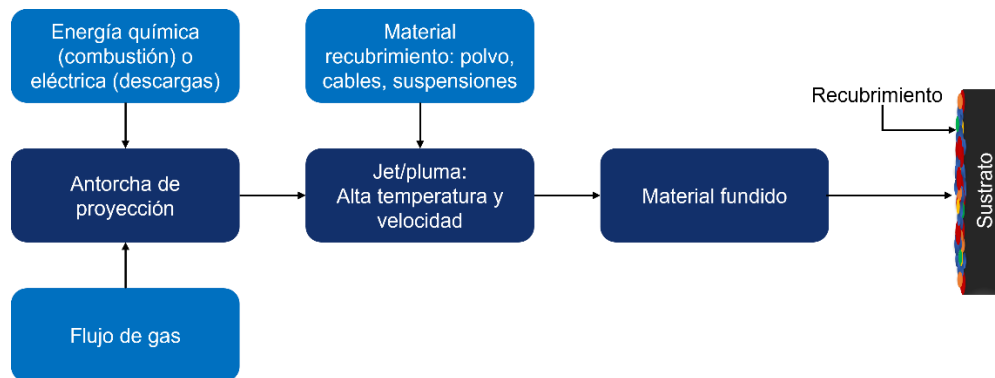


Figura 1: Esquema general de un proceso de proyección térmica [5].

La proyección térmica está dividida principalmente en dos ramas: la primera rama que contiene técnicas como proyección por llama (llama oxiacetilénica), proyección por llama de oxígeno de

alta velocidad (HVOF por sus siglas en inglés de *High Velocity Oxygen Fuel*) o D-Gun (pistola de detonación) que generan el calor y la energía por medio de reacciones químicas de los gases; la segunda rama contiene técnicas como proyección térmica por arco de plasma no transferido (*Atmospheric Plasma Spray* o APS, *Vacuum Plasma Spray* o VPS) y proyección térmica por arco de plasma transferido (*Plasma Transferred Arc* o PTA), las cuales generan la energía por medio de descargas eléctricas. Una segunda división se da en función del modo en que se encuentre el material a proyectar, dado que puede presentarse como polvos, alambres, suspensiones o barras. Se puede introducir una división adicional según el entorno en el cual se encuentra la pieza a recubrir y la antorcha: si están en vacío, en atmósfera controlada o al aire libre. Y finalmente, los procesos se pueden dividir según el consumo de energía y la tasa de deposición de los materiales [1]. En la Figura 2 se muestra la clasificación de las técnicas de proyección térmica según la naturaleza de la fuente de energía.

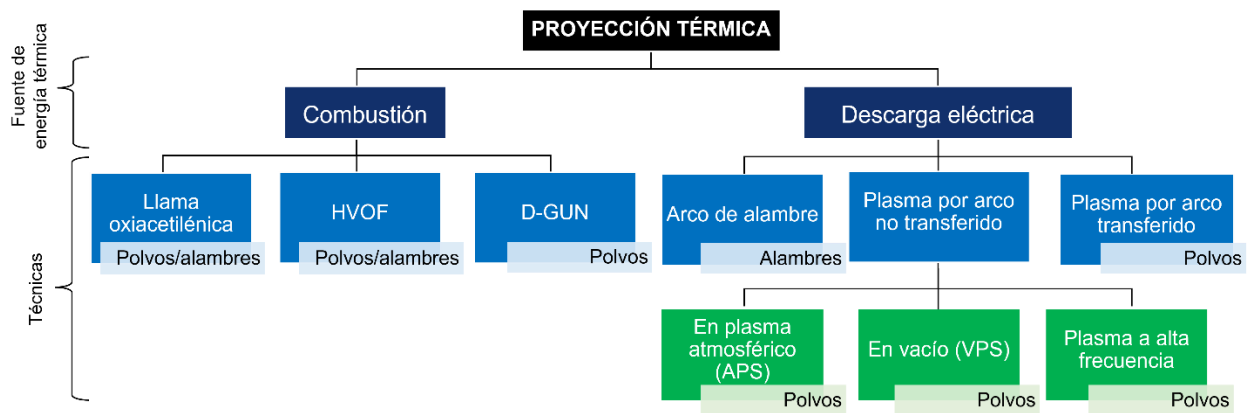


Figura 2: Clasificación de las tecnologías utilizadas en proyección térmica según la naturaleza de la fuente de energía térmica [5].

Cualquiera que sea la técnica de proyección térmica, excepto PTA, los recubrimientos se forman por partículas que viajan en el flujo de gas caliente (jet o pluma), donde se calientan y algunas se funden, para luego acumularse y adherirse sobre el sustrato a recubrir. La Figura 3, ilustra el proceso de la formación de un recubrimiento sobre un sustrato.

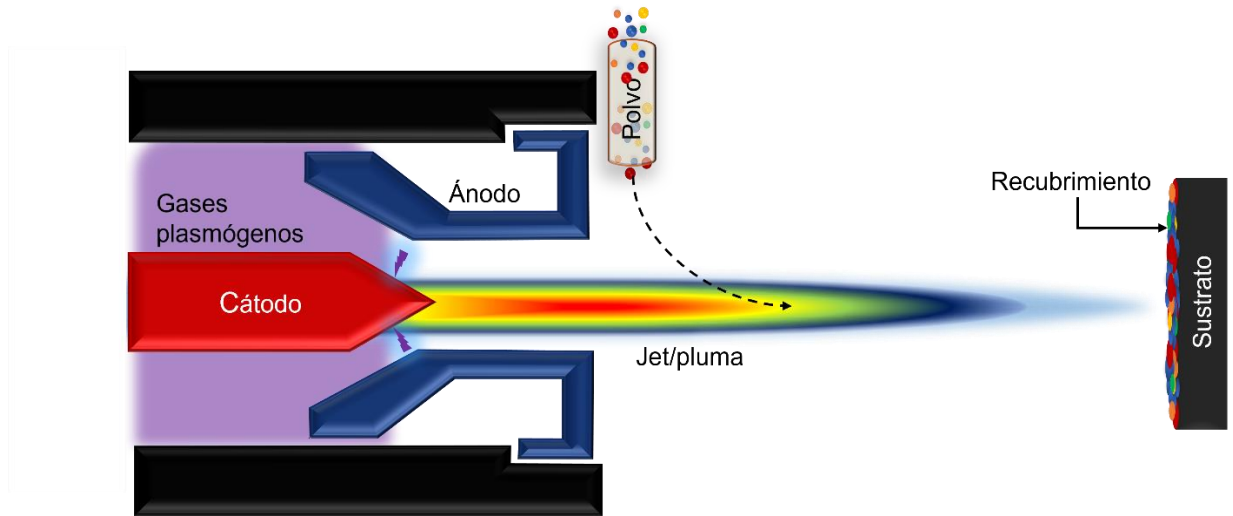


Figura 3: Esquema general de la formación de un recubrimiento elaborado por proyección térmica vía plasma.

En la proyección térmica vía plasma los materiales a proyectar son modificados a través de un plasma que se produce a presión atmosférica cuando un gas neutro o no oxidante se ioniza parcialmente a su paso a través de un arco eléctrico que es producido por una descarga de corriente cuya potencia puede alcanzar 60 kW. La naturaleza de la mezcla de gases que forman el plasma, el flujo de masa de las partículas y la potencia de la descarga eléctrica, son factores que influyen directamente en el grado de fusión de las partículas [12].

Desde el año 1970, la técnica ha tenido una gran evolución a pesar de que el diseño de la antorcha empleada para la proyección no ha tenido modificaciones sustanciales. Una antorcha de plasma típica, como la que se muestra en la Figura 4, consiste en un ánodo circular, generalmente de cobre, y un cátodo de tungsteno o grafito según la antorcha. La descarga de arco eléctrico, producida entre el ánodo y el cátodo, forma un jet de plasma en el que se inyecta el polvo con la ayuda de un gas de arrastre o portador, donde las partículas se aceleran, se calientan para fundirse y luego se apilan en el sustrato formando el recubrimiento [2].

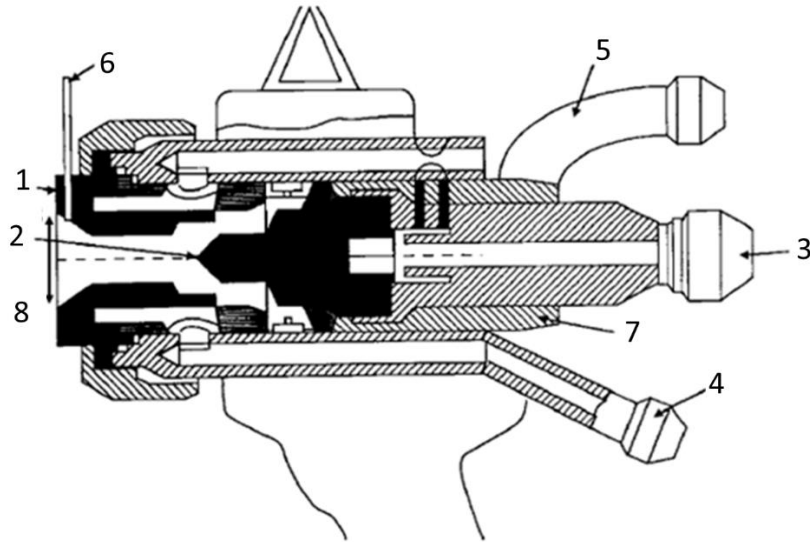


Figura 4: Configuración estándar de una antorcha de plasma: (1) ánodo, (2) cátodo, (3) conector de salida de agua y cátodo, (4) entrada de agua y conector de ánodo, (5) entrada para gases de trabajo, (6) inyector de polvo, (7) aislante eléctrico, (8) boquilla [10].

El proceso de proyección térmica posee una gran variedad de parámetros que influyen en la formación del recubrimiento, dentro de los cuales se encuentran el tipo, forma y propiedades de arco de plasma, así como los materiales de partida a ser proyectados y el sustrato.

Para crear el arco de plasma, un gas inerte fluye a través de la antorcha pasando entre el ánodo y el cátodo, pasa a través de la descarga, disociando sus moléculas e ionizándose, lo cual forma a la salida de la antorcha un jet de plasma. La temperatura y velocidad del jet de plasma varían según la distancia longitudinal y radial en su proximidad, como se muestra en la Figura 5 [10].

Las propiedades termodinámicas (entalpía de masa y calor específico) y las propiedades de transporte (viscosidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica) de una mezcla de gases dependen de la composición y la naturaleza de la mezcla. Usualmente se utilizan gases como argón (Ar), helio (He), nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2) o mezclas entre estos para la generación del plasma. Los plasmas producidos a partir de gases diatómicos como el hidrógeno y el nitrógeno son más energéticos que los producidos con gases monoatómicos como el helio (He). Las mezclas más frecuentemente utilizadas son Ar + H_2 , Ar + He, Ar + N_2 , N_2 + H_2 y Ar + H_2 + He [13] y suelen denominarse “gases plasmógenos”. El gas, o mezcla de gases plasmógenos, se debe elegir teniendo en cuenta el tipo de material que se desea proyectar y el tipo de antorcha a utilizar. Los gases de

alto peso molecular como el argón y el nitrógeno se utilizan como gases primarios para que el gas tenga una cantidad de movimiento suficiente como para empujar el arco desde el cátodo hacia el ánodo [13].

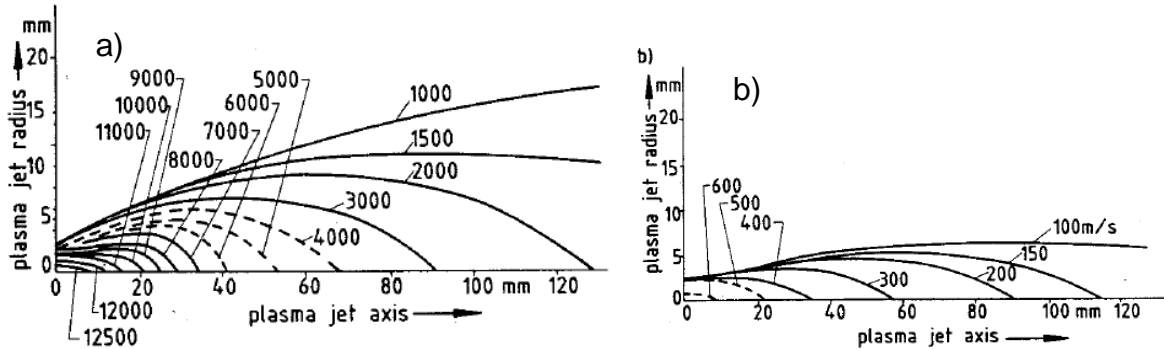


Figura 5. Comportamiento de la temperatura y velocidad del jet de plasma en diferentes ubicaciones dentro del mismo:
a) distribución de la temperatura de un jet de plasma, b) distribución de la velocidad de un jet de plasma [5].

El material a proyectar, usualmente en forma de polvos, debe seleccionarse teniendo en cuenta sus propiedades químicas (composición, fases cristalinas, clasificación), propiedades físicas (densidad, punto de fusión, calor específico de latencia), la morfología de las partículas (esféricas o irregulares), y el tamaño de partículas (típicamente entre 10 μm a 120 μm), principalmente, debido a que cada una de estas características influye en el proceso y es necesario tenerlas en cuenta para establecer los parámetros de proyección que tienen incidencia directa en la calidad de los recubrimientos obtenidos. El material de proyección debe fundirse evitando que sufra transformaciones no deseadas, como oxidación, sublimación o descomposición.

Actualmente, con la técnica de proyección por plasma, se pueden proyectar materiales que se dividen en los siguientes grupos [2]:

- Metales puros como: Mo, Ti, Al.
- Aleaciones como: NiCr, NiCrAlY, aceros.
- Pseudoaleaciones como: Cu-W, Al-Mo.
- Cerámicos como: Al_2O_3 , YSZ, ZrO_2 , TiO_2 .
- Cermets como: $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$, CW/Co.
- Polímeros como: poliéster, polietilenos.
- Materiales biocompatibles como la hidroxiapatita.

Los materiales que actúan como sustrato pueden ser, al igual que los materiales de proyección, de diversa naturaleza, sin embargo, los más comúnmente utilizados son metales o aleaciones metálicas como aluminios, aceros, hierros, cobre o bronce. La versatilidad de la técnica permite tener sustratos con diferentes formas y tamaños gracias a los distintos tipos de antorchas existentes, así como a los robots de control que se pueden utilizar para el desplazamiento de estas.

Como se mencionó anteriormente, durante los procesos de proyección térmica se dan diversos fenómenos fisicoquímicos que individualmente aportan al conjunto de respuestas de las condiciones de proyección de materiales particulados, conduciendo a la obtención de recubrimientos con características igualmente diversas. Por lo anterior, se justifica la implementación de estrategias que permitan predecir tanto las condiciones de proyección como las posibles características de los recubrimientos a obtener, lo cual se puede evaluar a través del uso de modelos computacionales, como se describe a continuación:

a) *Simulaciones computacionales de APS*

Los fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante la proyección en las fuentes de los procesos y en las interacciones con las partículas, son altamente complejos y envuelven relaciones entre dinámica de fluidos, fenómenos de transporte turbulentos, reacciones químicas y cambios de fases, lo cual hace del modelamiento de los procesos de proyección térmica un gran reto a nivel científico e ingenieril [13]. Debido a las limitaciones para resolver ecuaciones de conservación y fluidos turbulentos usando métodos analíticos en dos o tres dimensiones, solo los métodos numéricos son aplicables. Actualmente, la mayoría de las investigaciones se apoyan en softwares comerciales de simulación y modelación de los procesos de proyección térmica para resolver estas ecuaciones y contrastar con datos experimentales [14].

Gran parte de los códigos que se usan para el modelamiento consideran las partículas como entidades lagrangianas. Mediante el procesamiento estadístico de los datos calculados (velocidad de partícula, tamaño, estado de fusión) se hace posible determinar las distribuciones de los parámetros de partículas en varias secciones del jet y el patrón de impacto de las partículas en una posición del sustrato. Generalmente, los códigos utilizan el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ que ofrece una descripción general de la turbulencia mediante dos ecuaciones de transporte para describir, por un lado, la energía cinética de turbulencia, y por otro, la disipación de la energía de turbulencia [15]. Igualmente, se consideran coeficientes correctores para el arrastre de partículas y la

transferencia de calor a tener en cuenta las propiedades variables del plasma y los efectos no continuos del mismo [16].

Otro modelo utilizado para la simulación de procesos de proyección térmica es el de longitud de mezcla (Mixing Length) [17], de gran precisión para campos de flujo unidos a la pared, los cuales presentan gradientes significativos de presión y en los que la viscosidad del medio debe variar con la distancia a la pared, lo que le confiere el nombre de longitud de mezcla.

Dentro de estos códigos y formas de simulación, se destaca el algoritmo General Mixing (Genmix) desarrollado por Spalding y Patankar, el cual se caracteriza por su bajo uso de memoria y corto tiempo de cómputo, razones por la que es conocido como el “método bikini”. Este algoritmo permite, que usando conceptos de termodinámica y las propiedades de transporte de los gases de plasma, se prediga de manera rápida y bastante realista los campos de velocidad y temperatura del jet de plasma [17], [18].

Este tipo de software pronostica la dinámica de una o varias partículas alimentadas en un jet de plasma y permite:

- Calcular los parámetros críticos de la proyección por plasma.
- Presentar resultados sintéticos y explícitos de velocidad, temperatura, porcentaje de fusión y k de Sommerfeld¹.
- Dar información de las tendencias y órdenes de magnitud de los fenómenos.
- Pronosticar un resultado que se aproxime a la respuesta del experimento.

Otra perspectiva de modelamiento y simulación se encuentra en la aplicación de técnicas de cálculo numérico usando dinámica de fluidos computacional o CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*). Actualmente es posible encontrar bibliografía con revisiones acerca de los avances y trabajos realizados para diversas aplicaciones con técnicas CFD; por ejemplo, Moncho Esteve [19], recopila algunos de los trabajos más llamativos realizados con estas técnicas. La descripción sobre los modelos matemáticos y sus parámetros se recopila, de manera detallada, en los manuales de usuario del software ANSYS Fluent [20], [21]. Asimismo, algunos

¹ K de Sommerfeld hace alusión a una cantidad adimensional que relaciona la inercia de la gota respecto a la tensión superficial de esta y las fuerzas de inercia con la viscosidad. Se define con la siguiente expresión: $K = \left[\frac{\rho_p v_p}{\mu_p} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\rho_p \mu_p^2 d_p}{\sigma_p} \right]^{\frac{1}{2}}$ [39].

libros de mecánica de fluidos y elementos finitos tratan con detalle la física que describe los modelos CFD asociados a los procesos de proyección térmica [22]–[25].

b) *Modelamiento y simulación de flujos turbulentos.*

En Francia e Inglaterra, en el siglo XVII, se asentaron las bases de la dinámica de fluidos experimental. En los siguientes siglos en Europa, se dio gradualmente un desarrollo de los estudios teóricos que trataban de abordar los problemas planteados desde estas técnicas. Como resultado de ello, a lo largo del siglo XX, el estudio y práctica de la dinámica de fluidos, tanto en la ciencia (desde la física) como en ingeniería, estuvo basado en herramientas teóricas y experimentales [26]. A partir de la década de 1960, la aparición y desarrollo de los computadores de gran capacidad de procesamiento, junto con el desarrollo de algoritmos numéricos precisos, revolucionó la forma en la que hasta ese momento se había tratado la dinámica de fluidos. Es así, como gracias al creciente avance de la capacidad computacional y sus costes asociados, que los procesos de CFD, entendidos como un conjunto de métodos numéricos computacionales basados en la ecuación de la conservación de la masa y las ecuaciones de Navier-Stokes, se presentan actualmente como una poderosa herramienta que contribuye a la realización de investigaciones científicas y de ingeniería que ofrece grandes ventajas y complementa el estudio de la dinámica de fluidos [11]. Es importante aclarar que la CFD no pretende sustituir ni invalidar los estudios teóricos ni experimentales. Estos modelos numéricos son capaces de reproducir, en un esquema computacional eficiente, muchas de las aproximaciones clásicas, por lo cual complementa los estudios teóricos y los experimentales. En general, los diferentes métodos empleados en CFD para el tratamiento de fenómenos de turbulencia, pueden ser divididos fundamentalmente en tres técnicas [27]:

- Simulación numérica directa (DNS del inglés Direct Numerical Simulation).
- Modelo de Reynolds-Averaged Navier-Stokes o RANS.
- Large-Eddy Simulations (LES).

La diferencia de una técnica a otra en las simulaciones estriba, principalmente, en cómo es tratada la turbulencia. Mientras que la DNS resuelve todo el flujo con sus escalas temporales y espaciales, en RANS se modela todo el efecto de la turbulencia. Sin embargo, LES puede entenderse como una composición entre las dos primeras técnicas, haciendo uso de modelos de turbulencia únicamente para las escalas pequeñas y resolviendo el resto del problema como una cascada de

energía. La utilización de cada técnica depende, en esencia, del caso a simular y de los objetivos del proyecto. La técnica DNS, es de las tres técnicas, la que tiene el coste computacional más alto. Por otro lado, el modelo RANS es computacionalmente de menor costo, aunque se requieren modelos para simular el flujo turbulento, lo que implica la introducción de simplificaciones con el riesgo de caer en inexactitudes. Es así como surge la técnica LES, como intermedia, dado que es menos costosa de implementar que la DNS, pero más que la RANS y, a su vez, utiliza modelos de turbulencia para las estructuras turbulentas isotrópicas más pequeñas [27].

Como se ha mencionado, las CFD son una potente herramienta para modelar las interacciones con y entre fluidos. Sin embargo, desarrollar un modelo acertado en CFD, requiere un alto nivel de experiencia [28]. Cuando se desea generar un modelo válido para el conocimiento de la mecánica de fluidos de un proceso en particular el análisis de la necesidad de cada problema constituye un atributo esencial que permite:

- Decidir el nivel de detalle de la geometría.
- Elegir el tipo y la resolución de la malla.
- Seleccionar el modelo de turbulencia.
- Configurar las condiciones de contorno.
- Escoger las técnicas numéricas (es decir, considerar aspectos como el factor de relajación, el esquema de discretización, el número de iteraciones, criterios de convergencia, entre otras).

Existen, en este sentido, varios trabajos que proponen una metodología formal para que el tránsito de conseguir un modelo en CFD apropiado según el proceso a estudiar, no sea a través de prueba y error. Algunos de los escritos son el de Moncho Esteve [19], el cual es un desarrollo basado en la experiencia de años de trabajo con las técnicas mencionadas. Blocken et al [29], que ofrece 10 pasos concretos para las buenas prácticas al implementar modelos de CFD, además de tres artículos en los que relaciona un caso de alta complejidad que se desarrolló en relación con el comportamiento del flujo de corrientes de viento con edificaciones y en el cual se dan recomendaciones sobre la implementación de los modelos [29]–[31]. Igualmente, se identifica la metodología de trabajo de Hajdukiewicz [28] ilustrada en la Figura 6, en la que se explica cómo verificar y validar los modelos CFD, así como la forma de realizar el diseño paramétrico para evaluar la influencia de las condiciones de contorno en los resultados finales. El resultado del

proceso de validación es un modelo en CFD fiable que represente con precisión los fenómenos ambientales de la realidad.

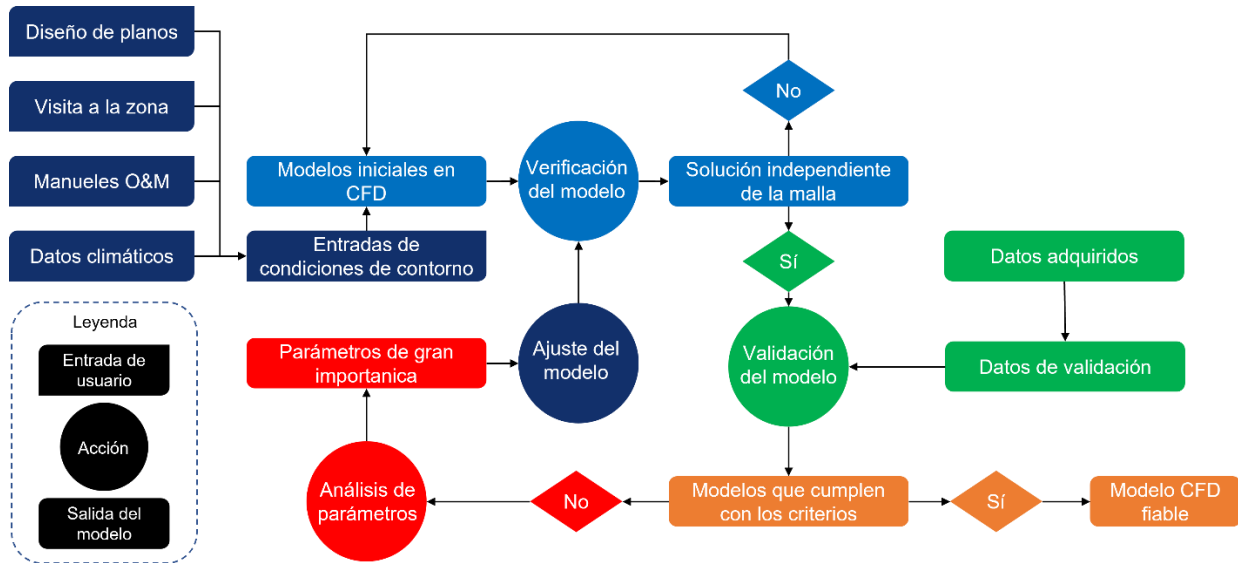


Figura 6: Metodología de trabajo para CFD propuesto por Hajdukiewicz [28].

En la actualidad, de los modelos CFD que aplican la metodología para la simulación termocinética de partículas en procesos APS, se puede destacar el trabajo de Lee et al [3], el cual analiza la rugosidad y espesor de un recubrimiento en función de la distancia de proyección y el flujo de partículas. Este autor usa también el software ANSYS Fluent versión 2019 para simular el movimiento de las partículas a través del jet. Bolot et al [32], [33], recomiendan la simplificación del modelo CAD teniendo en cuenta que el dominio a simular normalmente es exterior a la antorcha de proyección, por lo cual una geometría compleja de la antorcha acarrearía mayores costos computacionales innecesarios en términos del análisis termocinético tanto del jet de plasma como de las partículas.

Por último, Lewis et al [34] asientan y recopilan las bases teóricas sobre el tratamiento termocinético de las partículas en vuelo afectado directamente por la temperatura y velocidad del jet de plasma, las cuales, a su vez, dependen de las condiciones iniciales de proyección.

4.2. Marco teórico

El comportamiento termocinético de las partículas en vuelo durante un proceso de proyección térmica se da mediante tres fenómenos: la transferencia de cantidad de movimiento del jet a las partículas, la transferencia de calor a las partículas y la formación del recubrimiento.

En relación con la transferencia de cantidad de movimiento, la facilidad o dificultad del movimiento de las partículas dentro del jet de plasma depende de su morfología. Partículas del mismo material y tamaño, pero con diferente forma y masa, pueden generar recubrimientos con características físicas y propiedades mecánicas heterogéneas.

Los jets de plasma poseen altas velocidades las cuales se transfieren a las partículas para ser aceleradas. En la mayoría de los casos, mayores velocidades al momento en el que las partículas llegan al sustrato implican mejores cualidades en los recubrimientos formados.

Para explicar, de manera general la aceleración de una partícula al momento de entrar en contacto con el jet de plasma se utiliza un modelo lagrangiano que describe el movimiento de una partícula dentro de un fluido, suponiendo que la fuerza de arrastre es el efecto primario que ocurre cuando la partícula se transporta dentro de un jet de plasma y se describe de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{6} \rho_p \pi d_p^3 \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 \rho_g (\vec{V}_g - \vec{V}_p)^2 \quad (1)$$

Donde ρ_p y ρ_g son la densidad de la partícula y la densidad del gas respectivamente, d_p el diámetro de la partícula, C_D el coeficiente de arrastre y el cual depende del régimen de flujo del jet y se expresa utilizando el número de Reynolds (Re), \vec{V}_g y \vec{V}_p son respectivamente las velocidades del gas y de la partícula [35].

El coeficiente de arrastre depende de la velocidad de la partícula en relación con la velocidad del jet y puede variar según el régimen de flujo como se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_D = 24/Re, \quad Re < 2 \quad (2)$$

$$C_D = 24/Re (1 + 3/16 Re), \quad 0.2 \leq Re < 2 \quad (3)$$

$$C_D = 24/Re (1 + 0.11Re^{0.81}), \quad 2 \leq Re < 21 \quad (4)$$

$$C_D = (1 + 0.189Re^{0.632}), \quad 21 \leq Re < 200 \quad (5)$$

La Ecuación 2 describe el movimiento dentro de un régimen de Stokes², y la Ecuación 3 dentro de un régimen de Oseen³ [10]. En las ecuaciones anteriores, Re, corresponde al número de Reynolds que describe el movimiento relativo de una partícula dentro del jet de plasma y el cual está dado por:

$$Re = \rho_g d_p (v_g - v_p) / \mu_g \quad (6)$$

Donde μ_g es la viscosidad del flujo de gas.

Cuando una partícula se mueve por el jet, experimenta la interacción de varias fuerzas que describen su comportamiento cinético dentro del jet, tales como los descritos por por los siguientes modelos:

a) *Fuerza de arrastre F_D* : Ocurre cuando una partícula y un fluido (aquí plasma) están en movimiento relativo, y en consecuencia el fluido produce una fuerza de arrastre en la partícula [35] cuyo comportamiento se modela con la siguiente ecuación:

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D \pi \frac{d_p^2}{4} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p) \quad (7)$$

Donde, C_D es el coeficiente de arrastre descrito anteriormente, d_p es el diámetro de la partícula, V_g y V_p son las velocidades de la mezcla de gas y de la partícula respectivamente y ρ_g es la densidad de la mezcla de gases. Esta ecuación que describe el comportamiento de la fuerza de arrastre es una modificación de la Ecuación (1).

b) *Fuerza de Gravedad F_g* : Cuando una partícula se encuentra dentro un fluido la gravedad configura una fuerza que actúa acorde a las características físicas de la partícula (diámetro y densidad) y que se define como se muestra en la siguiente ecuación:

² Se considera que un fluido está en régimen de Stokes cuando es viscoso, laminar, incompresible y con bajo número de Reynolds [52]

³ El régimen de Oseen es una mejora del régimen de Stokes en la que se incluye la aceleración convectiva.

$$F_g = -\frac{\pi}{6}d_p^3(\rho_p - \rho_g)g \quad (8)$$

Donde ρ_p es la densidad de la partícula y g la constante de aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) [[17].

c) *Fuerza de peso aditiva* F_{ma} : Esta fuerza se crea por el volumen de fluido desplazado por la partícula [36] y está dada por:

$$F_{ma} = -\frac{\pi}{6}d_p^3\rho_g \frac{dv_g}{dt} \quad (9)$$

d) *Termofóresis* F_{th} : Esta fuerza está vinculada a la variación de temperatura alrededor de la partícula y se manifiesta como una fuerza que empuja la partícula desde áreas calientes a áreas frías según lo describe la siguiente expresión:

$$F_{th} = -\rho_g d_p^2 h \nabla T / T \quad (10)$$

Dónde ρ , h y T representan la densidad del gas, el coeficiente de convección y la temperatura de la partícula, respectivamente.

Las fuerzas de peso aditiva, gravedad y termofóresis, son relativamente bajas comparadas con la fuerza de arrastre, es decir, que la fuerza más influyente en la trayectoria de una partícula es la fuerza de arrastre, descrita por la Ecuación 7 [36].

En cuanto a la transferencia de calor del jet hacia las partículas, ésta depende de la distribución de tamaño, morfología, densidad, masa, conductividad térmica y velocidad relativa de dichas partículas, y se da simultáneamente de tres formas: por conducción, por convección y por radiación. La convección tiene su mayor contribución en los tramos iniciales del recorrido, donde el flujo de gas tiene la mayor temperatura y velocidad. La conducción es importante cuando las velocidades relativas disminuyen, lo que ocurre hacia la mitad del recorrido de la partícula. Por último, la transferencia por radiación se vuelve importante cuando se tienen partículas grandes [10].

La propiedad del jet de plasma que más influye en la transferencia de calor a las partículas es la conductividad térmica. La conducción y convección generalmente se describen por el número de Nusselt (Nu) que para la forma esférica de una partícula está dado por:

$$Nu = h d_p / \langle K_g \rangle = 20.66 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (11)$$

$$Pr = \mu_g c_{p_g} / K_g \quad (12)$$

Donde h es el coeficiente de convección, c_{p_g} es la capacidad calórica del gas a presión constante, K_g conductividad térmica de la mezcla de gases, μ_g es la viscosidad molecular de la mezcla de gases y Re y Pr son los números de Reynolds y Prandtl respectivamente descritos en las Ecuaciones 6 y 12.

El número de Nusselt aumenta con la temperatura superficial de las partículas. Si la transmisión de calor está dominada por la conducción, Nu está cerca de 2, entonces a medida que aumenta la transferencia convectiva, el número de Nusselt también aumenta [5].

La descripción de los fenómenos involucrados en la transferencia de calor a las partículas que se transportan por un jet de plasma se puede categorizar en función de la distribución de la temperatura dentro de las mismas. Se discuten dos casos distintivos: la partícula tiene una sola temperatura o la partícula tiene un gradiente de temperatura [5].

La distinción entre estas categorías depende del número de Biot (Bi) descrito según la siguiente ecuación:

$$Bi = h d_p / 2K_p \quad (13)$$

Donde h es el coeficiente de convección, d_p es el diámetro de la partícula y K_p conductividad térmica de la partícula.

Para un número $Bi < 0.01$ las partículas no tienen un gradiente de temperatura en el interior, mientras que para un $Bi > 0.01$ sí lo tienen. Por lo tanto, cuando en el proceso se producen partículas sin gradientes de temperatura es porque son de un material buen conductor de calor (altos valores de K_p), como metales, aleaciones o cuando las partículas son pequeñas [10]

Una forma de determinar cómo se funde un material es asumiendo que el calor transferido por el jet de plasma es similar al calor absorbido por cada partícula. Entonces, E_g es la energía transmitida por el jet de plasma dada por conducción, convección (primer término) y radiación (segundo término), E_p es la energía absorbida por la partícula descrita por el incremento de la entalpía (primer término) y la pérdida por radiación (segundo término):

$$E_g = \pi d_p^2 h (T_g - T_p) + h_r (T_g) \quad (14)$$

$$E_p = \frac{1}{6} \pi \rho_p c_{p_p} d_p^3 \frac{dT_p}{dt} + \pi d_p^2 \varepsilon_p \sigma T_p^4 \quad (15)$$

En estas ecuaciones T_p y T_g son respectivamente la temperatura de la partícula y la temperatura de la mezcla de gases, ε_p coeficiente de radiación y σ la constante Stefan–Boltzmann.

Para que una partícula de un diámetro dado sea fundida en el jet de plasma se debe cumplir que su dificultad para fundirse (*Difficulty Melting Factor* o DMF) sea menor que su capacidad para calentarse (*Ability Heat Factor* o AHF), lo cual se expresa como sigue:

$$AHF \geq DMF \quad (16)$$

$$AHF = \frac{L_m \left(\int_{300}^{T_g} K_g dT \right)^2}{\mu_g v_p} \geq \frac{H_m^2 d_p^2 \rho_p}{16} = DMF \quad (17)$$

Donde L_m representa el calor latente de fusión de una partícula fundida y H_m el calor por unidad de masa de una partícula fundida [5], [10]

Las partículas sufren diferentes comportamientos durante su vuelo antes de apilarse sobre el sustrato. Por ejemplo, para materiales con alta conductividad térmica, como los metales, el calor generado por el jet de plasma se transfiere por todo el volumen sin generar gradientes de temperatura considerables lo que conlleva a una vaporización completa de la partícula, pero para materiales de baja conductividad térmica, como los cerámicos, el calor se acumula en la superficie y se produce un gradiente de temperatura dentro de las partículas por lo que se genera una vaporización en la capa exterior, pero el interior continúa sólida o fría [13]. Lo anterior permite expresar los mecanismos de transferencia de calor a la partícula en el jet de plasma mediante cuatro

pasos sucesivos que se detallan a continuación: calentamiento de partículas sólidas, fusión a una temperatura constante, calentamiento de partículas líquidas y vaporización a temperatura constante.

- a) Calentamiento de partículas sólidas: La temperatura de una partícula sólida (T_p), se calcula a través de la energía térmica, por medio de la siguiente expresión:

$$dT_p/dt = 6Q_n / \pi d_p^3 C_p \rho_p \quad (18)$$

Donde Q_n es el flujo térmico recibido por la partícula por conducción y convección y C_p el calor específico de la partícula. La temperatura de la partícula se calcula con una evaluación térmica en la capa límite que la rodea.

- b) Fusión a temperatura constante: Cuando $T_p = T_m$ (temperatura de fusión), se considera que el calor recibido por la partícula se convierte completamente en calor latente de fusión. La fracción de masa de fusión se rige por:

$$dX_p/dt = 6Q_n / \pi d_p^3 \Delta H_m \rho_p \quad (19)$$

Donde ΔH_m es el calor latente de fusión del material, X_p es la fracción de masa de fusión que tiene valores entre 0 y 1; si $X_p = 0$ la partícula aún está sólida, si $X_p = 1$ la partícula está completamente fundida [37].

- c) Calentamiento de partículas líquidas: En este paso hay dos posibilidades, sea que la etapa líquida de la partícula se vaporiza o sea que no se vaporiza. Si no se asume la vaporización, el calentamiento de la partícula se rige aún por la expresión para partículas sólidas [38]. Si se supone la vaporización de la etapa líquida, entonces:

$$d(d_p)/dt = 6Q_n / \pi d_p^3 \Delta H_b \rho_p \quad (20)$$

Donde ΔH_b es el calor latente de vaporización.

- d) Vaporización a temperatura constante: Cuando $T_p = T_b$ (temperatura de ebullición), se considera que el calor recibido por la partícula se convierte completamente en calor latente de vaporización [13].

En el momento en que las partículas terminan su vuelo (llegada al sustrato) empieza a ocurrir la formación del recubrimiento que dependen fuertemente del contacto de las partículas con el sustrato y entre ellas. Las partículas pueden estar fundidas, semi fundidas o sólidas en el momento del apilamiento. Las partículas que llegan en estado sólido rebotan y caen del sustrato sin adherirse a él o quedan pobremente conectadas con el mismo, lo que constituye una situación no deseada debido a que afectan negativamente las propiedades mecánicas del recubrimiento [5].

Cuando una partícula fundida entra en contacto con el sustrato se aplasta sobre el mismo y se deforma, convirtiéndose en un *splat* que se solidifica creando un montículo donde las siguientes capas de partículas llegan y se apilan y van generando el recubrimiento. En la Figura 7 se muestra un *splat* (disco) característico y su interacción con un sustrato.

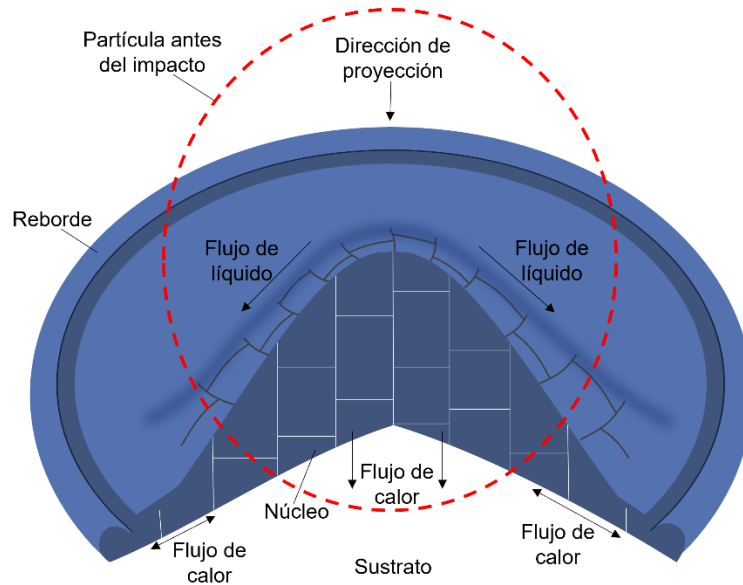


Figura 7. Interacción entre una partícula y el sustrato [8].

La morfología de un *splat* resultante cuando una partícula impacta contra el sustrato depende de la energía cinética de la partícula, la velocidad de solidificación y la rugosidad de la superficie. La Figura 8 representa dos tipos de morfología de *splat* cuando la partícula es proyectada sobre un sustrato liso.

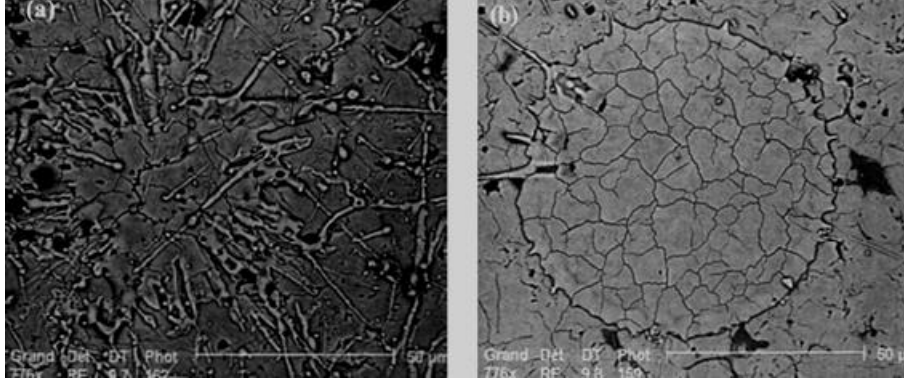


Figura 8. Morfología de un *splat* producido en el impacto de una partícula líquida de YSZ (ZrO_2 estabilizada con Y_2O_3) sobre un sustrato liso: (a) *splat* en forma de salpicadura, (b) *splat* bien formado en forma de disco [1].

La formación de un *splat* se produce en pocos microsegundos, pero la formación de un recubrimiento de varias capas sucesivas a partir de múltiples recorridos de la antorcha puede tardar algunos segundos o minutos, dependiendo del espesor requerido, el tamaño de la pieza y la velocidad de movimiento relativo de la antorcha [39].

La estructura final de un recubrimiento consiste en *splats*, partículas semi fundidas o no fundidas y huecos. Todas estas características son de tamaños micrométricos y la estructura obtenida cuando las partículas son nanométricas se constituye por estas características en tamaños nanométricos o bimodales (cuando los tamaños de las partículas y las características de los recubrimientos incorporan las dos escalas: nanométrica y micrométrica).

El comportamiento de una partícula líquida proyectada se ha descrito utilizando el método desarrollado por Keppel y Mundo cuando estudiaron el impacto de gotas de agua y etanol sobre superficies frías, el cual consiste en un número adimensional (K) que relaciona la inercia de la gota respecto a la tensión superficial de esta y las fuerzas de inercia con la viscosidad [40], [41]. De esta manera se define el K de Sommerfeld como:

$$K = We^{1/2} Re^{1/4} \quad (21)$$

$$K = \left[\frac{\rho_p v_p}{\mu_p} \right]^{1/2} \left[\frac{\rho_p \mu_p^2 d_p}{\gamma_p} \right]^{1/4} \quad (22)$$

Donde We y Re son el número Weber y Reynolds respectivamente, ρ es la densidad, v es la velocidad, μ la viscosidad, d el diámetro y γ_p la tensión superficial de la partícula [41].

Keppel y Mundo, definieron que por medio de este número adimensional es posible predecir la interacción entre la partícula y el sustrato, considerando que si K es menor a 3 la partícula rebota al llegar al sustrato y cae sin adherirse, y si K es mayor a 57.7 la partícula forma salpicaduras al impactar con el sustrato y habrá una inadecuada formación del *splat* provocando que gran parte del material se pierda. De acuerdo con lo anterior, el valor de K deseable debe darse dentro de los valores de 3 y 57.7 para que la partícula al impactar con el sustrato se adhiera formando un *splat* [42].

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar mediante herramientas computacionales la correlación entre parámetros de proyección con propiedades termocinéticas de partículas cerámicas en vuelo al variar la distribución de tamaño de estas dentro de un jet de plasma y contrastando su influencia con propiedades microestructurales de recubrimientos, tales como porosidad y microdureza.

5.2. Objetivos específicos

- Estudiar la influencia de los perfiles termocinéticos del jet de plasma sobre el comportamiento en vuelo de partículas con una determinada distribución de tamaño.
- Establecer modelos de transferencia de calor y momentum de las partículas que viajan dentro del jet de plasma que expliquen su comportamiento en vuelo y permitan identificar parámetros de control en el proceso de proyección térmica por plasma.
- Seleccionar e implementar modelos estadísticos de correlación de los parámetros de proyección empleados con la velocidad y temperatura de las partículas en el plano de proyección.
- Validar experimentalmente la influencia de los parámetros termocinéticos de las partículas evaluados en las simulaciones, a través de características microestructurales de los recubrimientos obtenidos.

6. METODOLOGÍA

Los procesos que se relacionan con fenómenos de dinámica de fluidos, para su correcto análisis requieren que los sistemas de cálculo permitan la simplificación de la geometría del volumen a analizar, flexibilidad para definir los modelos matemáticos con el ajuste adecuado (enfoque lagrangiano o euleriano) según los fenómenos físicos que describen, posibilidad de controlar los parámetros que se busca evaluar en relación con los fenómenos físicos y los modelos matemáticos además de altas capacidades de cómputo, principalmente. Dentro de las herramientas más utilizadas, se encuentra el método de elementos finitos dado su elevado nivel de desarrollo y disponibilidad de softwares para implementar modelos relacionados con dinámica de fluidos.

La simulación computacional de fenómenos físicos que emplean métodos como el de los elementos finitos, consideran su ejecución a través de la realización de tres pasos fundamentales que inician con la definición del dominio del problema y modelos físicos que describen el problema a resolver, para luego determinar las condiciones límite con las cuales se solucionan dichos modelos matemáticos y, por último, culminan con la valoración y análisis de los resultados obtenidos que se llevan a etapas finales de validación para su interpretación.

La etapa de validación se logra mediante la realización de experimentos de proyección térmica de partículas de ZrO_2 estabilizadas con 8 % wt. de Y_2O_3 (YSZ por sus siglas de *Ytria Stabilized Zirconia*), para obtener recubrimientos cerámicos sobre sustratos de acero inoxidable, de acuerdo con lo establecido en el programa de investigación que acoge la realización de este proyecto de investigación de maestría. En dicha etapa, se hizo uso de equipos industriales para la elaboración de los recubrimientos, que son propiedad de EPM y los cuales determinan los límites de algunas de las condiciones y parámetros de las proyecciones térmicas APS realizadas en el presente trabajo, y que para el caso de la antorcha SinplexPro se reúnen en la Tabla 1:

Tabla 1: Condiciones de operación de la antorcha SinplexPro.

Tipo de Antorcha		SinplexPro Oerlikon Metco
Diámetro de la boquilla		9 mm
Inyección de polvo	Tipo	Externa, perpendicular al eje de la antorcha
	Tasa	1.2 kg/h
	Diámetro del inyector	1.8 mm

Distancia de proyección		105 mm
Energía	Voltaje	94-97 V
	Intensidad de corriente eléctrica	400-520 A
	Potencia Eléctrica	39-57 kW
Mezcla de gases		Ar + H ₂
Composición de la mezcla		88 - 12% Vol.
		50 l/min – 7 l/min

De este modo, la investigación realizada y documentada en el presente texto, implicó la realización de tres etapas, así: i) simulaciones CFD, ii) validación experimentación, y iii) análisis y correlaciones; estas se ilustran en la Figura 9 y se describen a continuación.

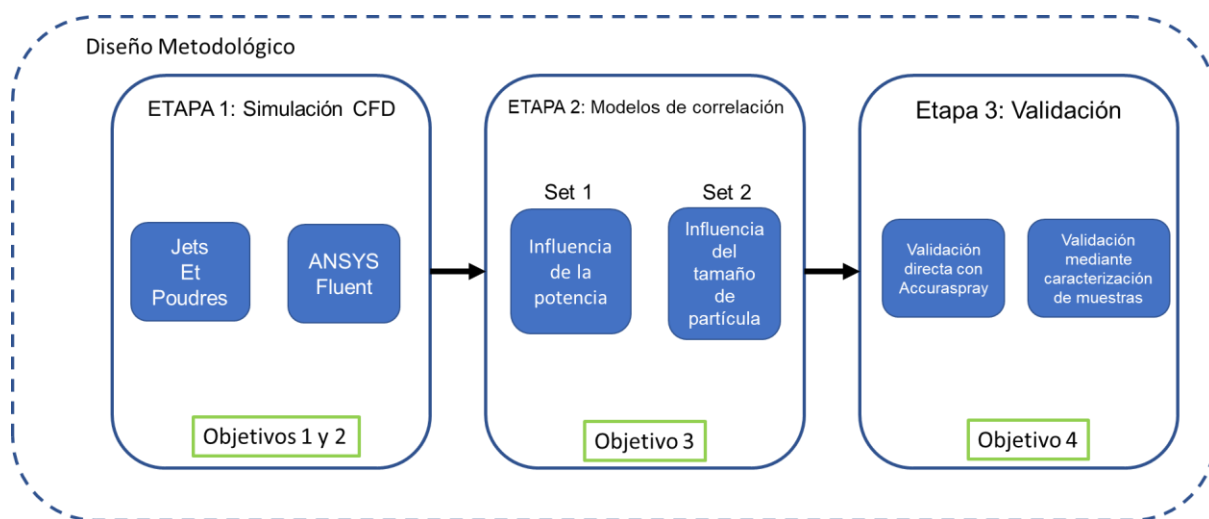


Figura 9: Diagrama de etapas del diseño metodológico.

6.1. Etapa 1: Simulación CFD

En esta etapa de la investigación se propone el uso de las herramientas computacionales *Jets & Poudres* y *ANSYS Fluent* para la implementación de simulaciones de dinámica de fluidos (CFD) que permitan obtener valores de velocidad y temperatura (perfiles termocinéticos) de partículas evaluando la incidencia de cambios en los parámetros de proyección.

Para la obtención de información termocinética de las partículas en el plano de proyección se debe dividir esta etapa en dos:

- a) Simulación preliminar del jet de plasma usando *Jets & Poudres*: el uso de parámetros de entrada tales como mezcla y flujo de gases, potencia de la antorcha, distancia de proyección y geometría de la boquilla permiten simular la pluma del jet para, de esta manera, poder identificar la temperatura (T_g) y la velocidad (V_g) en el plano de salida de la antorcha, lo cual constituye un suministro inicial o dato de entrada para el programa *Ansys Fluent*.
- b) Tracking de partículas mediante el software *Ansys Fluent*: a partir de la geometría de la antorcha, la temperatura y velocidad del jet en el plano de la boquilla además de la velocidad con la que se inyectan las partículas se calcula el recorrido que sigue el material además de permitir conocer también su velocidad (V_p), temperatura (T_p) y la desviación que sufren de acuerdo con sus tamaños. Con simulaciones de esta naturaleza es posible obtener el perfil termocinético de las partículas al llegar al plano de proyección.

La Figura 10 ilustra las dos secciones que constituyen esta etapa.

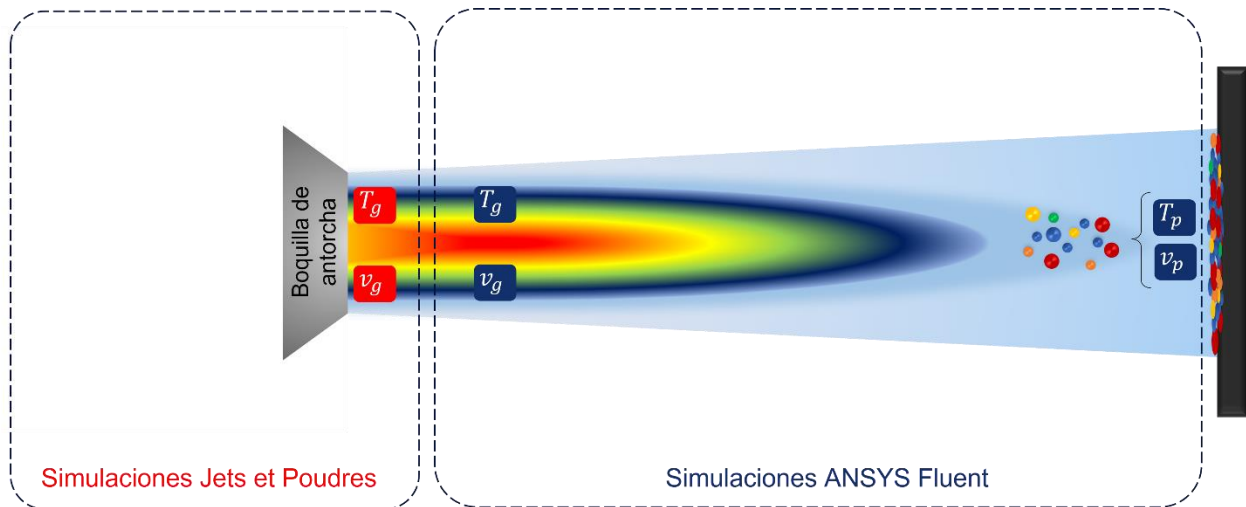


Figura 10: Diseño metodológico de la etapa 1.

Ambas partes de esta etapa requieren investigación orientada a la comprensión de los fenómenos físicos presentes en el proceso APS para asegurar que se esté emulando de manera satisfactoria el fenómeno correspondiente a los parámetros ingresados y, de este modo, conducir al cumplimiento de los objetivos específicos 1 y 2.

En la Figura 11 se plantea el diagrama de cajas en el que se muestran las entradas y salidas para cada software utilizado y cómo estos están conectados a través de las variables de temperatura y velocidad de los gases plasmógenos.

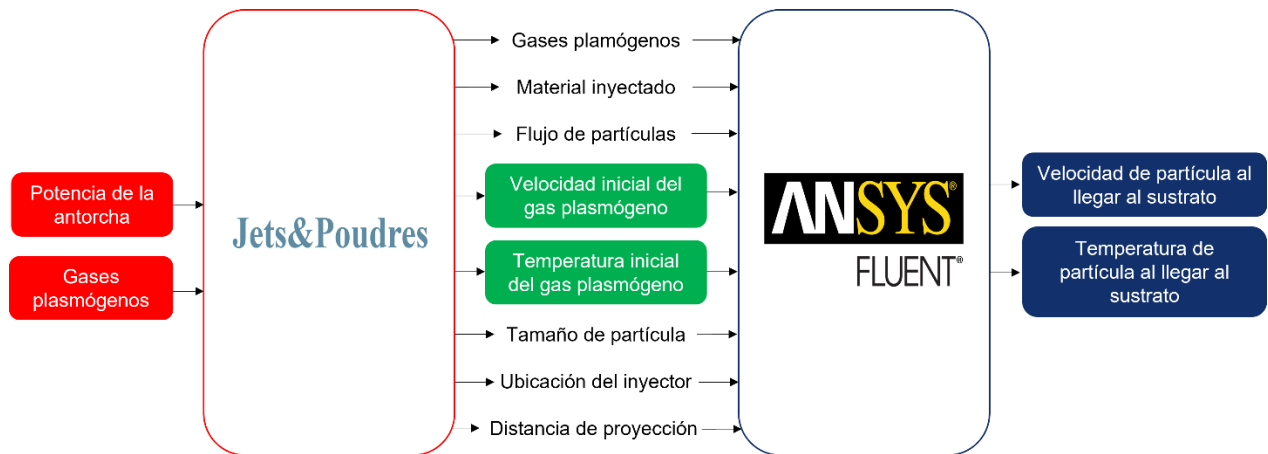


Figura 11: Diagrama de cajas para el protocolo de simulación.

Usando el software *Jets et Poudres* es posible calcular la velocidad y temperatura del jet de plasma en la boquilla de salida de la antorcha, lo cual no es posible con el software ANSYS ya que no está incorporado en módulo de transformación de energía eléctrica a cinética. Estos dos valores van a ser dependientes de parámetros como la mezcla de gases plasmógenos, la potencia de la antorcha y las especificaciones geométricas de la misma. Insertando los valores previamente mencionados en la interfaz gráfica del software y corriendo la simulación se obtienen los resultados esperados. En la Figura 12 (a) se muestra la interfaz del programa mencionado, mientras en la Figura 12 (b) está el perfil térmico del cual se extrae la temperatura y velocidad del jet de plasma en las boquillas manualmente usando el cursor que indica el valor requerido.

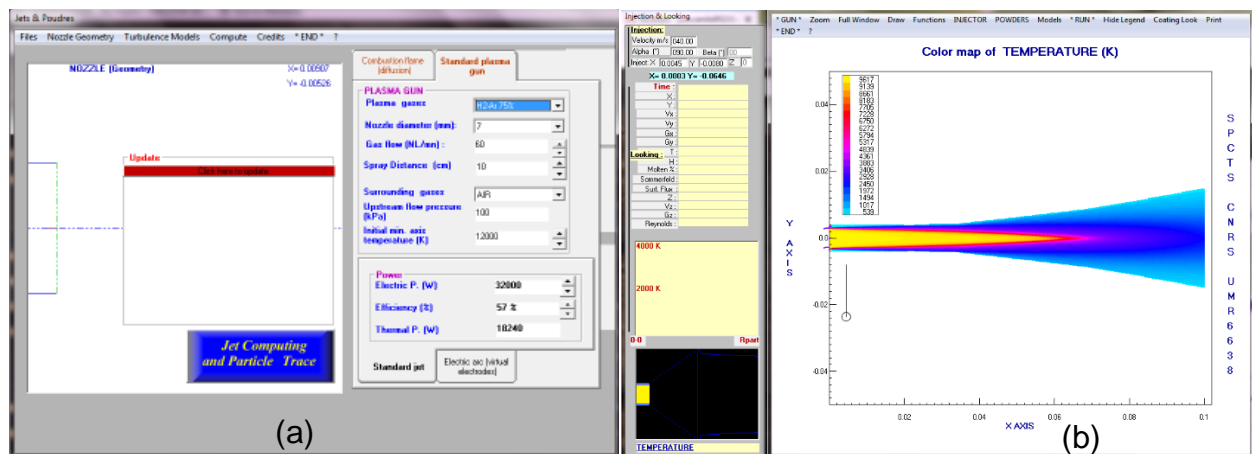


Figura 12: (a) Interfaz de Jets et Poudres; (b) perfil térmico del jet de plasma.

Las variaciones en la potencia de la antorcha que se evalúan en la etapa 2 de la metodología se realizan en este software, por lo que cambios en la potencia de operación afectan la velocidad y temperatura inicial del jet de plasma.

Una vez se tienen las condiciones termocinéticas iniciales del jet, se emplea el software *ANSYS Fluent* con el cual se implementa un protocolo de simulación que permita generar variaciones en el tamaño de partícula inyectado y evaluar con la temperatura y la velocidad con que llegan al sustrato.

El primer paso es la construcción del dominio 3D de simulación y el mallado. Para ello se tiene en cuenta el diámetro de la boquilla (9 mm), la distancia de inyección (1.5 mm), la distancia hasta el sustrato (105 mm), así como tipos y tamaños de elementos de malla a utilizar.

En este caso, se implementaron 334,546 elementos de orden cuadrático que se distribuyeron en 461,569 nodos para crear una malla de elementos regulares, como se muestra en la Figura 13. Para lograr una relación óptima entre el tiempo de cálculo y la resolución de los resultados, se utilizó un control de tamaño de elemento. Esto permitió obtener una calidad de malla adecuada, con un parámetro de asimetría o skewness del 17 %.

Con el objetivo de obtener los mejores resultados posibles, además de garantizar la calidad de la malla, se redujo al mínimo el tamaño de los elementos. Este valor se determinó experimentalmente, alcanzando el límite máximo de resolución y capacidad de cálculo disponible.

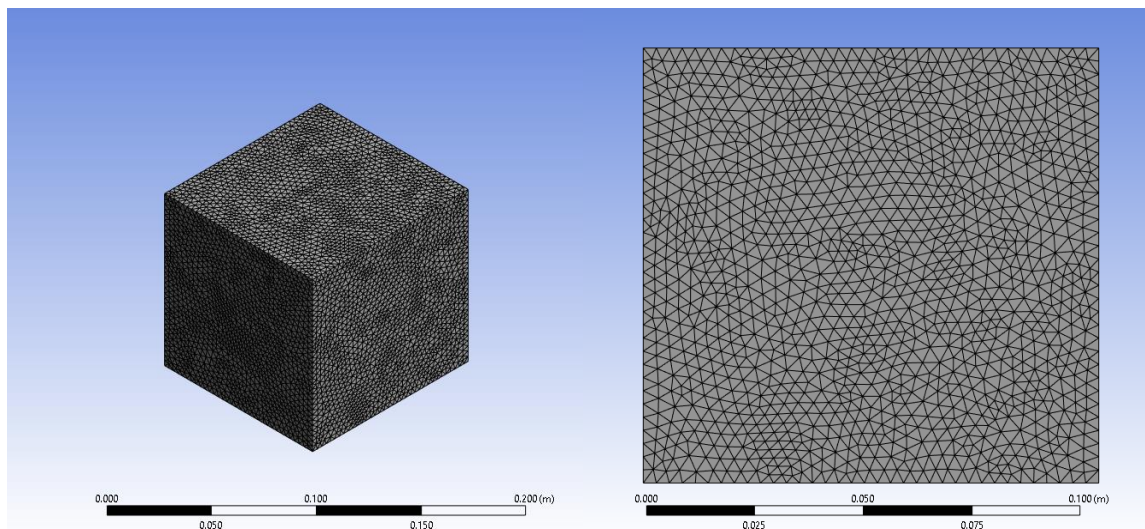


Figura 13: a) vista angular del dominio de simulación b) vista frontal del dominio de simulación.

Una vez construido el dominio de la simulación se asigna a las condiciones de frontera la aceleración gravitacional (9.8 m/s^2), se define la ecuación de transferencia de energía y se establece el modelo multifase en el cual se le especifica al programa que se tiene una fase sólida (las partículas) y una fase gaseosa (gases plasmógenos). Este modelo define la transferencia de momentum, de calor y la relación en la interfase partícula-plasma. Para la transferencia de calor se implementa el modelo “Ranz-Marshall” [44] para el flujo de calor entre una esfera y un gas a altas temperaturas, teniendo presente que no se presentan cambios de fase, considerando las partículas como sólidas durante todo el trayecto. Este modelo de transferencia de calor es ampliamente usado para las simulaciones de procesos APS. En este punto también se define el $k-\varepsilon$ como método para resolver turbulencias a usar en estas simulaciones teniendo en cuenta que en diferentes trabajos previos se recomienda su uso gracias a la buena relación entre resolución de gradientes y tiempo de cómputo [45]–[47].

Posteriormente se asignan las condiciones de ingreso de partículas, así como características del material a inyectar, como densidad y calor específico del YSZ, al igual que el tamaño de partícula, lo cual es fundamental para la evaluación de la influencia de este parámetro en el perfil termocinético al llegar al plano de proyección. La posición y tasa de inyección, así como la velocidad y temperatura inicial de las partículas se establecen asimismo en este paso.

Teniendo como insumo la información brindada por *Jets et Poudres* se definen las condiciones de frontera en la boquilla. Se determinan la temperatura, velocidad y composición del gas plasmógeno.

Antes de iniciar la simulación se determinan los números de pasos y el tamaño de estos. Este paso es clave puesto que se debe considerar un paso de tiempo lo suficientemente pequeño para que las grandes velocidades y temperaturas del plasma generen una no-convergencia de la simulación, sin embargo, a medida que el *timestep* se hace más pequeño, el tiempo de cómputo crece, si se conserva la misma cantidad de iteraciones por *timestep*. Es por esto por lo que se debe garantizar la convergencia optimizando el tiempo de cómputo.

Una vez concluye la simulación se obtienen los siguientes perfiles de temperatura y velocidad, dando paso así a la Etapa 2 de la Metodología.

Este protocolo de simulación presenta las siguientes consideraciones o limitaciones:

- Las partículas inyectadas son esferas sólidas lo cual debe tenerse en cuenta como potencial factor de error puesto que, en la realidad, las partículas no siguen este comportamiento ideal.
- No hay transformación de fase en el material inyectado, este se mantiene sólido. Esto afecta el comportamiento térmico de las partículas durante su recorrido.
- Solo se inyecta partículas de un solo tamaño por simulación, no es posible, por el momento inyectar distribuciones de tamaño en una misma simulación. Esto difiere del fenómeno real puesto que en el laboratorio no es posible inyectar un solo tamaño de partícula, siempre sigue una distribución.
- Este protocolo no incluye la formación de recubrimiento, su alcance va hasta que la partícula alcanza la distancia de proyección, sin tener contacto con el sustrato.

6.2. Etapa 2: Construcción del modelo de correlación

Esta etapa inicia con el establecimiento de un diseño de experimentos que oriente las actividades de simulación que dan como resultado los datos que conducen al cumplimiento del objetivo específico 3. En este sentido, se planteó realizar una matriz de simulaciones para obtener diferentes temperaturas y velocidades de partícula en el plano de proyección a partir de variaciones en el tamaño de partícula y la potencia de la antorcha empleada en la experimentación. Se propuso entonces la realización de un conjunto de 21 simulaciones iniciando con partículas de 10 μm hasta llegar a 110 μm variando cada 5 μm y otro conjunto con 11 simulaciones recorriendo el rango de operación en potencia de la antorcha (modulada por la corriente) desde 400 A hasta 520 A con pasos de 12 A. Con cada valor tanto de tamaño de partícula como de corriente, mediante las simulaciones se conduce a encontrar la velocidad y la temperatura de conjuntos de partículas en el plano de proyección, suministro con el cual se construye un modelo de correlación usando regresiones lineales múltiples para así proponer una ecuación de ajuste, basada en pruebas de hipótesis, análisis de varianza y de medias para obtener un modelo que logre predecir la influencia del tamaño de las partículas y de la potencia en la velocidad y temperatura de estas en el plano del recubrimiento.

Al momento de tener el protocolo de simulación listo, es posible definir el diseño de experimentos para estudiar tanto la influencia del tamaño de partícula como de la potencia en los perfiles

termocinéticos de las partículas en el plano de proyección y consecuentemente con características microestructurales como porosidad o microdureza.

Para esta etapa se desarrollan dos conjuntos de simulaciones independientes, en el primero se varía la potencia de la antorcha y se conservan los demás parámetros constantes, así como lo muestra la Tabla 2.

Este diseño tiene algunas consideraciones: la distancia de proyección se mantiene constante en 105 mm, se evalúan tres tamaños de partícula que caractericen una distribución propia de un proceso APS y se toma el promedio de las temperaturas y velocidades obteniendo así un método que busque asemejarse al sensor AccuraSpray por el que pasan partículas de diferentes tamaños y éste toma un promedio sobre un área de medida. Se escogieron los tamaños de 55, 80 y 100 μm para realizar la simulación puesto son valores que están dentro de la distribución de tamaño de partícula del polvo Metco 204 NS-G que se usará para validar este modelo. Es importante aclarar que no se usan tamaños inferiores a 55 μm debido a que en simulaciones realizadas (ver Figura 28) se identificó que partículas inferiores a 40 μm presentan temperaturas muy altas que superan el punto de vaporización del material, lo que hace que el análisis no sea realista si lo que se quiere es validar directamente con mediciones de temperatura y velocidad.

Tabla 2: Diseño experimental para simulaciones variando la potencia de la antorcha.

Muestra	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	J&P		ANSYS							
						Tp en plano de proyección (K)			Vp en plano de proyección (m/s)			Tp Prom (K)	Vp Prom (m/s)
				Tg en boquilla (K)	Vg en boquilla (m/s)	55 μm	80 μm	100 μm	55 μm	80 μm	100 μm		
A1	400	93.2	37266.6										
A2	412	92.8	38223										
A3	424	94.0	39846.6										
A4	436	94.1	41020.5										
A5	448	94.2	42196.8										
A6	460	94.9	43650.9										
A7	472	95.1	44886.3										
A8	484	95.9	46416.3										
A9	496	96.0	47619										
A10	508	95.8	48672										
A11	520	96.4	50135.4										

Para el segundo conjunto de simulaciones se busca evaluar la incidencia del tamaño de partícula en el perfil termocinético, para esto se desarrolla el siguiente diseño de experimentos presentado en la Tabla 3.

Tabla 3: Diseño experimental para simulaciones variando el tamaño de partícula inyectado.

ANSYS			
Muestra	Tamaño (µm)	Tp plano (K)	Vp plano (m/s)
B1	10	Resultado	Resultado
B2	15	Resultado	Resultado
B3	20	Resultado	Resultado
B4	25	Resultado	Resultado
B5	30	Resultado	Resultado
B6	35	Resultado	Resultado
B7	40	Resultado	Resultado
B8	45	Resultado	Resultado
B9	50	Resultado	Resultado
B10	55	Resultado	Resultado
B11	60	Resultado	Resultado
B12	65	Resultado	Resultado
B13	70	Resultado	Resultado
B14	75	Resultado	Resultado
B15	80	Resultado	Resultado
B16	85	Resultado	Resultado
B17	90	Resultado	Resultado
B18	95	Resultado	Resultado
B19	100	Resultado	Resultado
B20	105	Resultado	Resultado
B21	110	Resultado	Resultado

Al igual que en el conjunto anterior, se conserva la distancia de 105 mm hasta el sustrato y se define una potencia de 40.42 kW para todas las muestras garantizando así que los cambios en los resultados sean debido a las variaciones en el tamaño de las partículas.

Con estos diseños experimentales se obtienen valores que relacionen los parámetros de control (potencia de la antorcha y tamaño de partícula) con las variables de salida (temperatura y velocidad de las partículas en el plano de proyección).

6.3. Etapa 3: Validación experimental

Con el objetivo de poder verificar el ajuste de los resultados logrados mediante las simulaciones, se proyecta un polvo de referencia Metco 204 NS-G con una distribución de tamaño de partícula

ilustrada en la Figura 14, la cual presenta un d_{10} igual a 25.91 μm , d_{50} igual a 57.52 μm y un d_{90} igual a 107.18 μm .

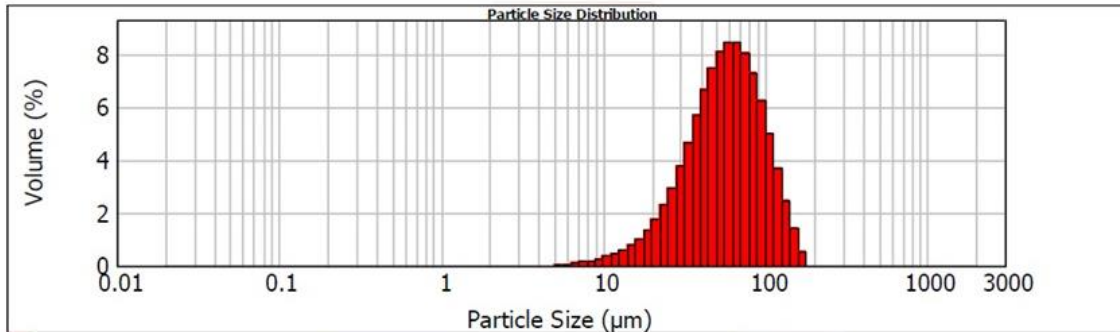


Figura 14: Distribución de tamaño de partícula del polvo de validación Metco 204 NS-G para validar el primer conjunto de simulaciones.

Para medir la temperatura y velocidad de las partículas al llegar al plano de proyección se utiliza el grupo de sensores AccuraSpray-G3C, desarrollado por Tecnar Industries y que hace parte del equipamiento dispuesto por EPM para la ejecución de este proyecto, y el cual permite registrar y visualizar las velocidades y temperaturas de las partículas al llegar al plano de proyección. Estas mediciones se realizan al conjunto de 11 muestras en las que se está evaluando la influencia de la potencia de la antorcha en el perfil termocinético de las partículas. De esta forma, se obtiene un valor experimental de temperatura y velocidad para cada parámetro de potencia aplicada en la antorcha, y así, poder comparar con los valores que se extraen de las simulaciones.

Para la verificación experimental de la influencia del tamaño de partícula en los recubrimientos se caracterizaron 4 muestras de YSZ de referencia Metco 204NS-G fabricados con la antorcha Sinplex Pro ubicada en las instalaciones de EPM. Posteriormente, dichos recubrimientos fueron evaluados a través de análisis de porosidad y microdureza siguiendo las normas ASTM E2109 [43] y ASTM C1327 [44].

Para la elaboración de estos recubrimientos se emplearon 4 distribuciones de tamaño de partícula diferentes, con el fin de proveer de información a las posteriores correlaciones de velocidad y temperatura de las partículas al momento de llegar al recubrimiento y con la información microestructural proveniente de las caracterizaciones, realizar un análisis de la influencia del perfil termocinético de las partículas en el plano de proyección sobre las características

microestructurales de los recubrimientos de YSZ, respondiendo de este modo, al objetivo específico 4.

En esta etapa lo que se busca es validar los resultados computacionales obtenidos mediante verificaciones experimentales de la siguiente manera:

6.3.1. Validación del primer conjunto de simulaciones.

Para el primer conjunto de simulaciones se plantea una verificación directa en la que usando un sensor de velocidad y temperatura se capturen los valores medios de las partículas al cruzar por la zona de registro establecida a 105 mm de la boquilla de la antorcha mediante comparación con datos experimentales obtenidos mediante pirometría óptica.

- Sistema de sensores Accuraspray-G3C:

El sistema de sensores es el Accuraspray-G3C desarrollado por la empresa Tecnar Industries fue diseñado para registrar, visualizar y comparar continuamente hasta ocho parámetros al realizar procesos de proyección térmica. Se basa en un protocolo de control que le permite realizar todas las acciones de operación de forma remota enlazado con un computador para su control y visualización [45].

Es posible realizar registros de:

- Temperatura de partículas en vuelo.
- Velocidad de partículas en vuelo.
- Posición del jet de plasma.
- Ancho y largo del jet de plasma.
- Intensidad del jet de plasma.
- Temperatura en la cabeza del sensor.
- Temperatura del sustrato.

Su funcionamiento depende del controlador, el cual digitaliza el video tomado por una cámara CCD y los datos registrados por el sensor de temperatura [45]. El sistema realiza los cálculos necesarios y devuelve los resultados a través de la interfaz de usuario en la pantalla del computador, que consiste en tres partes: una ventana de visualización del jet con variables del proceso (intensidad, velocidad y temperatura de partículas) en tiempo real, la ventana de

visualización del perfil del jet de plasma y la ventana de gráficas en tiempo real de todas las variables digitales del proceso. En la Figura 15 se muestra dicha interfaz con la especificación de cada ventana de visualización.



Figura 15: Interfaz de usuario del software visible en el computador.

El dispositivo de fibra óptica dual del Accuraspray-G3C captura el flujo de las partículas en dos puntos de medición diferentes a lo largo del cono de proyección. Dos señales de brillo detectadas por un sensor a unos pocos milímetros de distancia permiten calcular un valor de retardo de tiempo muy preciso a través de un análisis de correlación cruzada. La velocidad puede entonces calcularse a partir de este tiempo de retraso ya que el espacio entre los dos puntos de medición es constante y conocido con precisión [45].

Las señales detectadas provenientes del sistema se filtran en dos longitudes de onda diferentes, lo que permite el uso del principio de pirometría de longitud de onda gemela para medir la temperatura media de la partícula. El valor de correlación se normaliza entre 0 y 1. Un umbral de correlación establecido normalmente en 0.6 asegura que ambos puntos de medición corresponden a la misma población de partículas y, por lo tanto, que la pirometría de longitud de onda gemela funciona correctamente [45].

Como todo sensor, el sistema Accuraspray G3C posee unas especificaciones técnicas y rangos de medición específicos, los cuales son [45]:

- Temperatura de partículas: 1000°C o más a 2.5 % de precisión.
- Velocidad de partículas: 5-1200 m/s con 0.5 % de precisión.

- Campo de visión de la cámara CCD: 380 mm precisión.
- Dimensiones: 185 mm x 105 mm x 65 mm.

Así, con la información obtenida con este sistema de sensores es posible validar los resultados del primer conjunto de simulaciones, recolectando datos que se registran en la planilla que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Datos a recolectar en el primer conjunto de simulaciones para validación experimental.

Muestra	Potencia (W)	ANSYS								Experimental	
		Tp en plano (K)			Vp en plano (m/s)			Tp promedio (K)	Vp promedio (m/s)	Tp promedio (K)	Vp promedio (m/s)
		55 μm	80 μm	100 μm	55 μm	80 μm	100 μm				
A1	37266.6										
A2	38223										
A3	39846.6										
A4	41020.5										
A5	42196.8										
A6	43650.9										
A7	44886.3										
A8	46416.3										
A9	47619										
A10	48672										
A11	50135.4										

Una vez se obtenga tanto el modelo teórico (proveniente del protocolo de simulación) como los datos experimentales, se realizan pruebas de hipótesis para verificar que los coeficientes del modelo teórico sí relacionen la variable independiente (Potencia eléctrica) con las variables independientes (Temperatura de las partículas y velocidad de las partículas). Consecuentemente se hallan los residuales entre datos experimentales y modelo teórico para identificar la raíz del error cuadrático medio, lo que permite conocer los errores de predicción del modelo teórico frente a la validación experimental.

6.3.2. Validación del segundo conjunto de simulaciones.

Siendo el tamaño de partícula el parámetro de control en este conjunto no es posible validar directamente como se hizo con el primer conjunto debido a que al realizar proyecciones APS no se logra garantizar que se estén depositando partículas del mismo tamaño al no tener un sistema de tamizado de tanta precisión. Estas diferencias en el tamaño de las partículas proyectadas conducirían a valores de temperatura y velocidad experimentales que corresponderían a un espectro de tamaños e imposibilitarían la comparación con las simulaciones desarrolladas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone realizar una validación mediante la proyección de 3 muestras tamizadas a diferentes distribuciones de tamaño de partícula y su posterior caracterización en porosidad y microdureza siguiendo las normas ASTM E2109 [42] y ASTM C1327 [43] respectivamente. Así se tiene un guía sobre la incidencia del tamaño de partícula sobre el perfil termocinético de las partículas al llegar al sustrato y también de cómo esto afecta las características microestructurales del recubrimiento.

- *Proyecciones de verificación:*

Como se menciona anteriormente, se realizan tres proyecciones para generar tres recubrimientos diferentes compuestos de una capa de anclaje realizada con el polvo Amdry 386-2.5 y una capa externa realizada con cada una de las distribuciones de tamaño luego de tamizar el polvo Metco 204NS, el cual se ilustra en la Figura 16 .

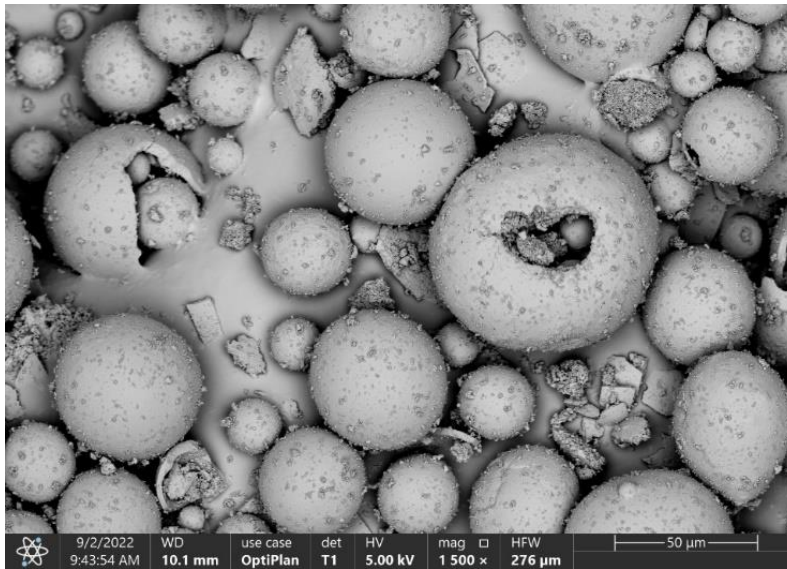


Figura 16: Imagen con microscopía electrónica de barrido del polvo Metco 204NS usado en las etapas 2 y 3 de este informe.

Los parámetros de proyección para las tres muestras proyectadas se describen en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros de proyección para la verificación del segundo conjunto de simulaciones.

Muestra	Potencia (W)	Gases		Distribución de tamaño de partícula		
		Ar (NLPM)	He (NLPM)	d10 (µm)	d50 (µm)	d90 (µm)
E1	40420	50	7	15.8	24.3	37.9
E2				25.9	43.3	69.9
E3				30.5	62.2	110.3

Estas distribuciones de tamaño se obtuvieron a través de una clasificación de tamaños con tamices que permitieron seleccionar los tres rangos de distribución que se presentan en las Figura 17, Figura 18 y Figura 19.

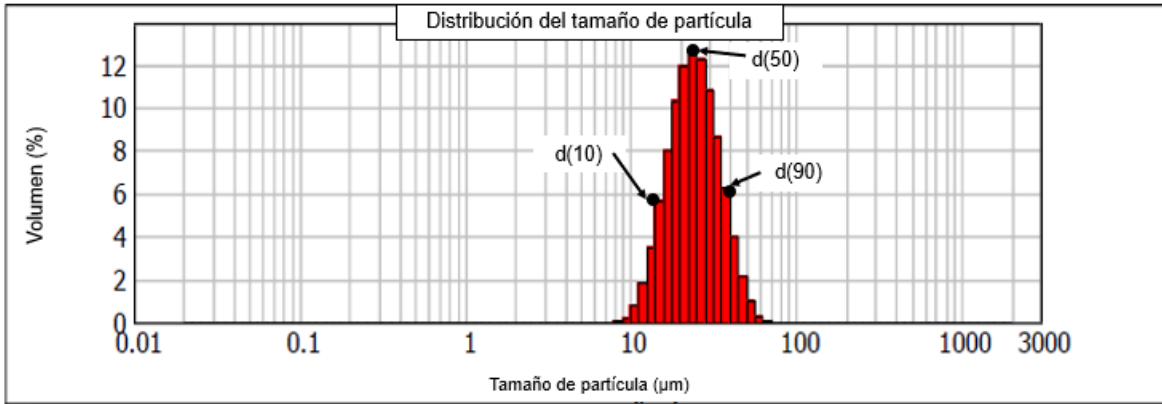


Figura 17: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E1.

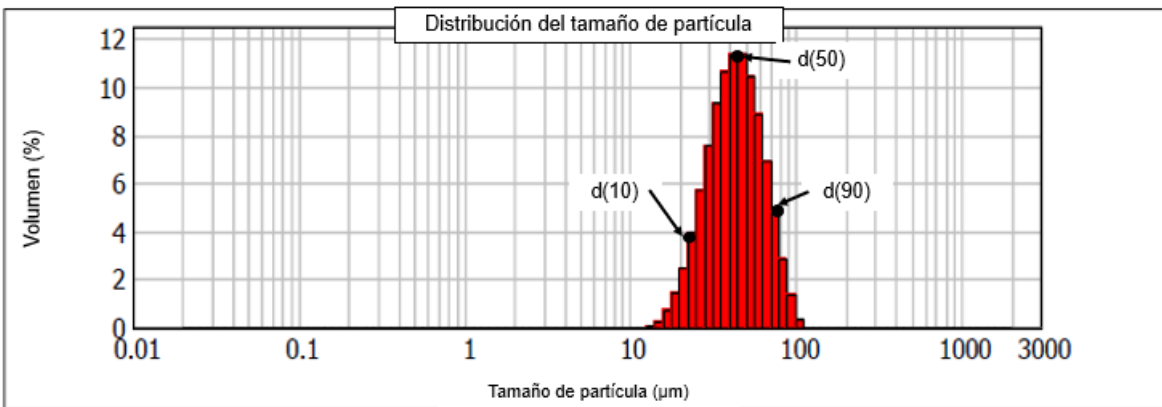


Figura 18: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E2.

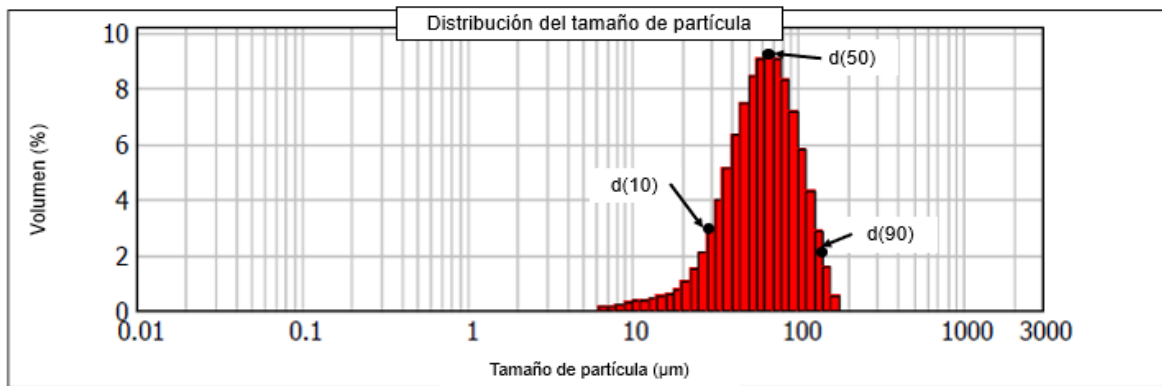


Figura 19: Distribución de tamaño de partícula del polvo utilizado en la muestra E3.

Una vez se tienen las muestras proyectadas, se preparan para las caracterizaciones relevantes para este estudio.

La preparación de las muestras consta de distintas etapas: primero se sumerge la muestra en una resina de modo que al secarse permita realizar un proceso de corte sobre la sección transversal del recubrimiento evitando al máximo introducir daño sobre la superficie del mismo; posteriormente, sobre la muestra cortada, se realiza un proceso de pulido para obtener el acabado superficial que se requiere para evaluar la calidad microestructural de los recubrimientos. El proceso de pulido se lleva a cabo con lijas de diferentes calibres (empezando por el más grueso y terminando en el más fino), luego se realiza pulido fino en paño utilizando partículas de alúmina de diámetro de 5 μm , 1 μm y 0.5 μm para luego usar suspensión de pasta de diamante de 0.3 μm . El proceso de preparación finaliza y las muestras son llevadas a un metalizador en el cual se aplica una capa de oro-paladio de 15 nm de espesor que permita la visualización de las muestras que van a ser analizadas usando microscopía electrónica de barrido.

Luego de esta preparación las muestras son sometidas a caracterización de la microestructura, porosidad y microdureza.

- Caracterización microestructural:

La evaluación de las características microestructurales de los recubrimientos generados se realiza sobre la superficie del recubrimiento, evaluando con un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6490) los *splats* (observación superficial de partículas que conforman el recubrimiento), grietas o partículas sin fundir que se puedan percibir. Esta forma de evaluación es fundamental para comparar los resultados obtenidos en las simulaciones, en los datos experimentales y en las características del recubrimiento obtenido.

Para este proceso se realiza la observación en 4 ubicaciones diferentes de la muestra para cubrir un área de la superficie del recubrimiento y en cada lugar se realizan observaciones con capturas de imagen a 3 diferentes magnificaciones en el microscopio (600X, 1000X y 2000X) para su posterior análisis.

- Porosidad:

La porosidad es una medida de los espacios vacíos que posee un material, en este caso es la medida de espacios vacíos que se generan durante la formación de los recubrimientos. Esta característica es evaluada sobre la sección transversal del recubrimiento, tomando 20 imágenes de cada una de las muestras en diferentes ubicaciones con ayuda de un microscopio óptico y posteriormente se

calcula la porosidad con la ayuda del software ImageJ™ de procesamiento digital de imágenes. Con el software se realiza una conversión de la imagen a blanco y negro asignando a los pixeles del recubrimiento el color negro y a los de los poros el color blanco (Figura 20); este proceso es conocido como binarización de imágenes. Una vez las imágenes se encuentra binarizadas se selecciona el área correspondiente al recubrimiento (región de pixeles negros) y, con la ayuda del software se realiza el cálculo de la proporción de área negra que se encuentra dentro del área total encerrada, y por lo tanto la resta entre el área total y la proporción de área da como resultado el porcentaje de porosidad que tiene el recubrimiento. Este proceso se hace para cada una de las 20 imágenes de cada muestra.

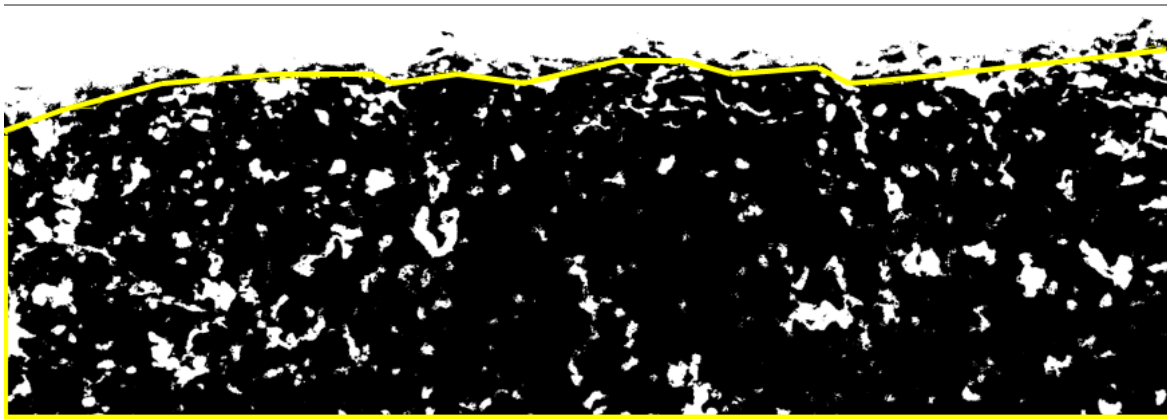


Figura 20: Sección transversal de un recubrimiento luego del proceso digital para la medición de la porosidad.

- Microdureza:

Siguiendo la norma ASTM C1327 y usando el microdurómetro 401MVD de la marca Wilson Instruments se realiza el cálculo de la dureza del material, expresada en GPa. Se construye la curva de calibración para identificar la carga de indentación idónea para este material. Una vez se selecciona la carga, se realizan 10 indentaciones con punta piramidal para posteriormente medir las diagonales de la huella y con esta información calcular la dureza en escala GPa, usando la Ecuación 23.

$$HV = \frac{0.0018544 \times P}{d^2} \quad (23)$$

donde P es la fuerza aplicada y d es la medida de la diagonal promedio en la huella.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan en tres etapas, cada una acorde con el diseño metodológico establecido en la sección 5 de este informe.

7.1. Resultados de la construcción del modelo CFD.

El primer paso para la construcción de la simulación CFD involucra la extracción de valores de velocidad y temperatura del jet de plasma a partir de la caracterización de la antorcha Sinplex Pro. Como se establece en la sección 5.1, para esto se hace uso del software *Jets et Poudres* y con las condiciones iniciales se obtienen los perfiles térmicos y cinéticos ilustrados en las Figura 21 y Figura 22, en los cuales se muestra el jet obtenido bajo las condiciones experimentales de la muestra A1 con una potencia de operación de 37300 W.

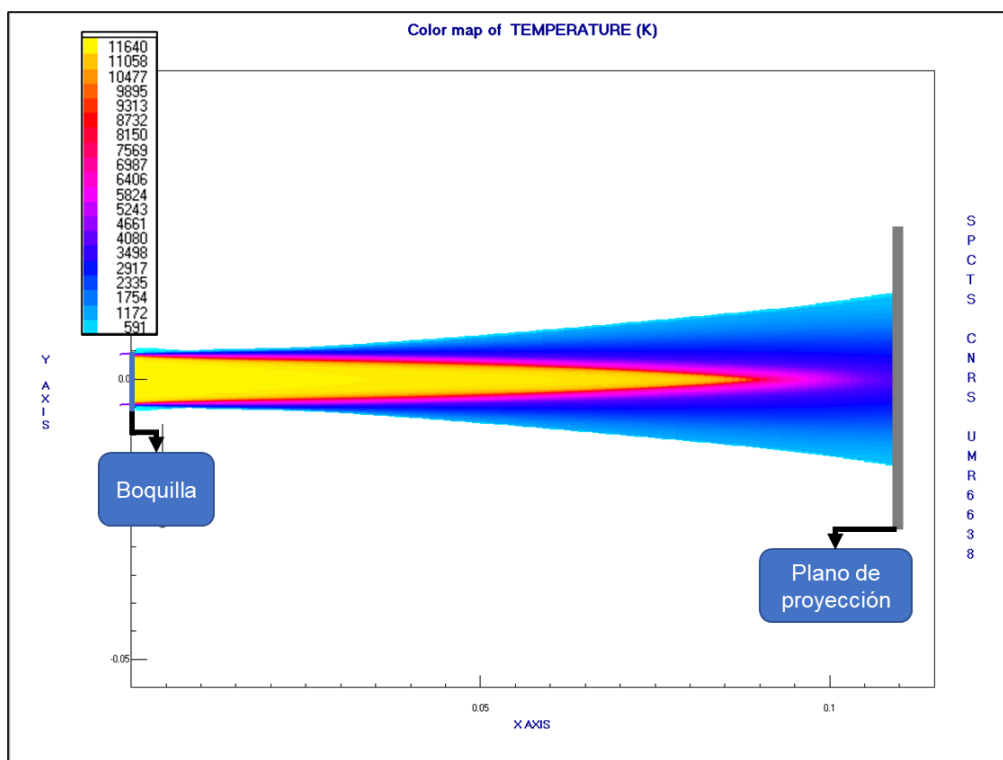


Figura 21: Perfil térmico del jet de plasma a 37300 W en Jets et Poudres.

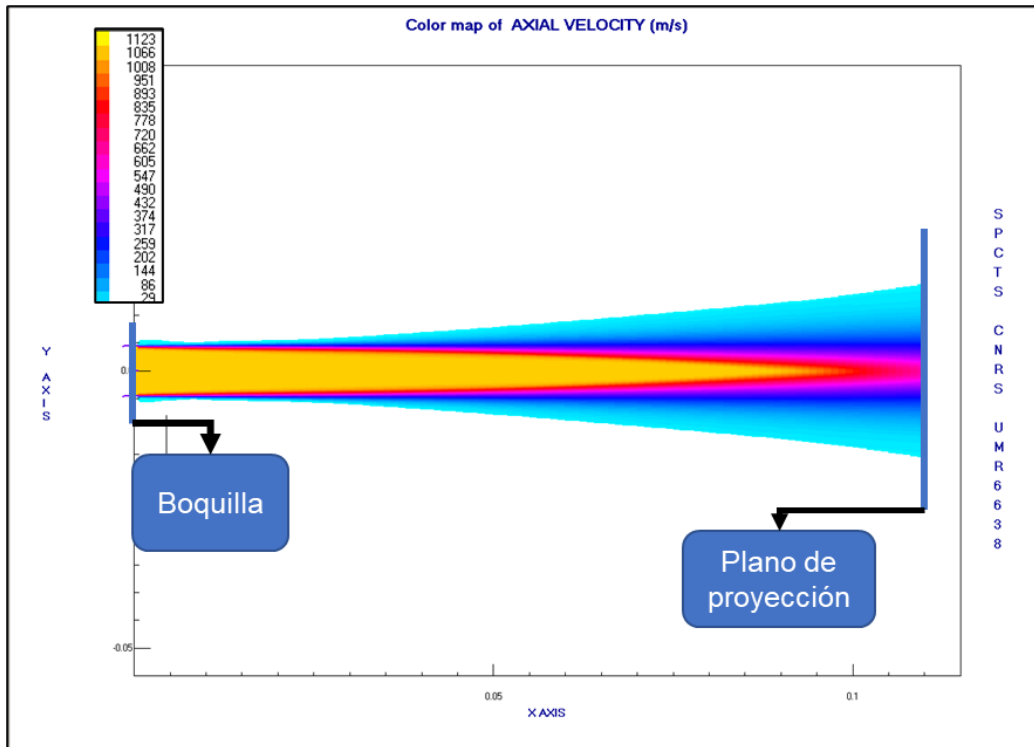


Figura 22: Perfil cinético del jet de plasma a 37300 W en Jets et Poudres.

A partir de estos perfiles es posible extraer la temperatura y velocidad del plasma en la boquilla, puesto que esta es una condición inicial para la construcción de la simulación en *ANSYS Fluent*.

Una vez se aplica y desarrolla el protocolo de simulación establecido previamente, se ejecuta el modelo y se obtienen tanto el perfil de velocidades como el de temperaturas del jet de plasma (ver Figura 23 y Figura 24) al igual que la trayectoria de la partícula y sus distintas propiedades termocinéticas para el recorrido que realiza (ver Figura 25 y Figura 26).

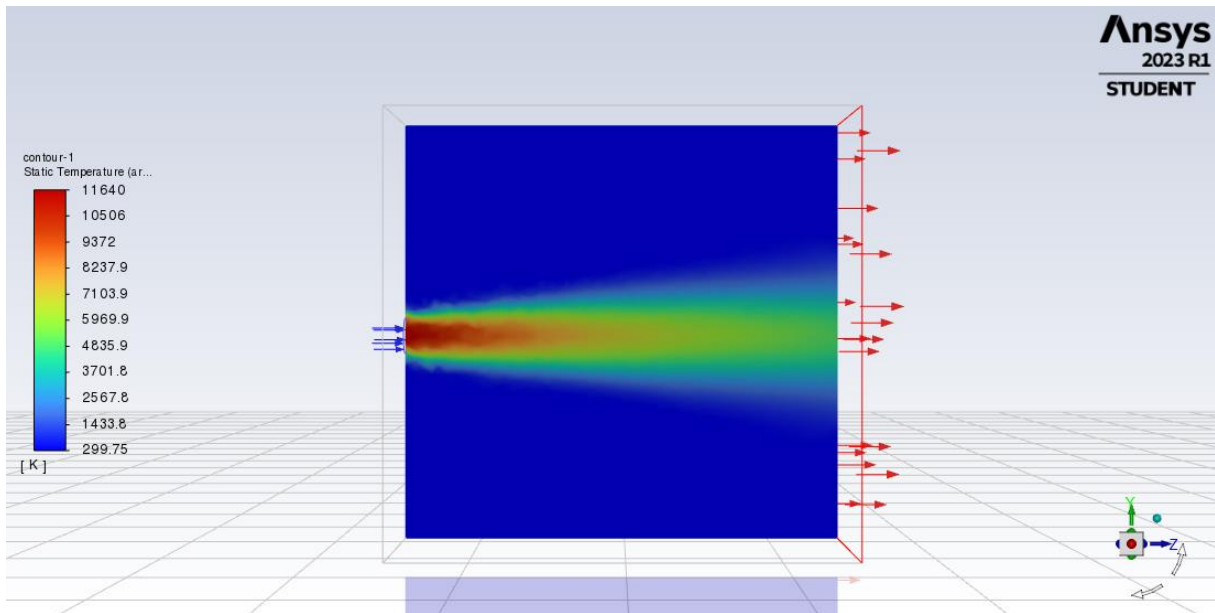


Figura 23: Perfil térmico del jet de plasma en una proyección a 37300 W de operación obtenido mediante ANSYS Fluent.

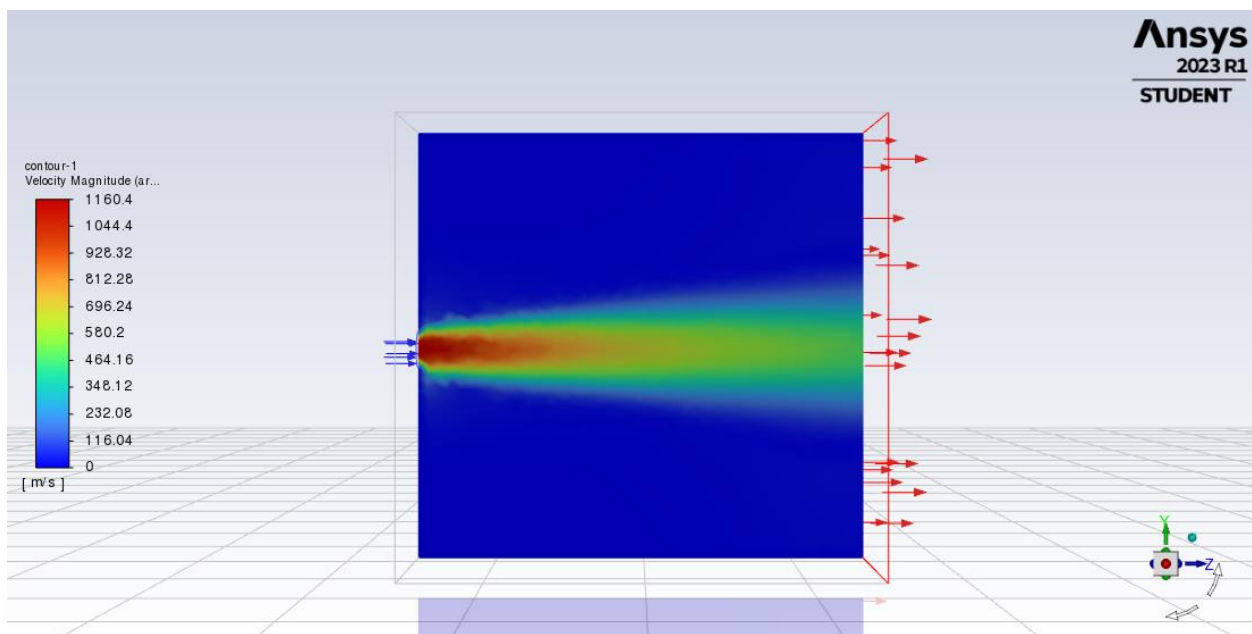


Figura 24: Perfil cinético del jet de plasma en una proyección a 37300 W de operación obtenido mediante ANSYS Fluent.

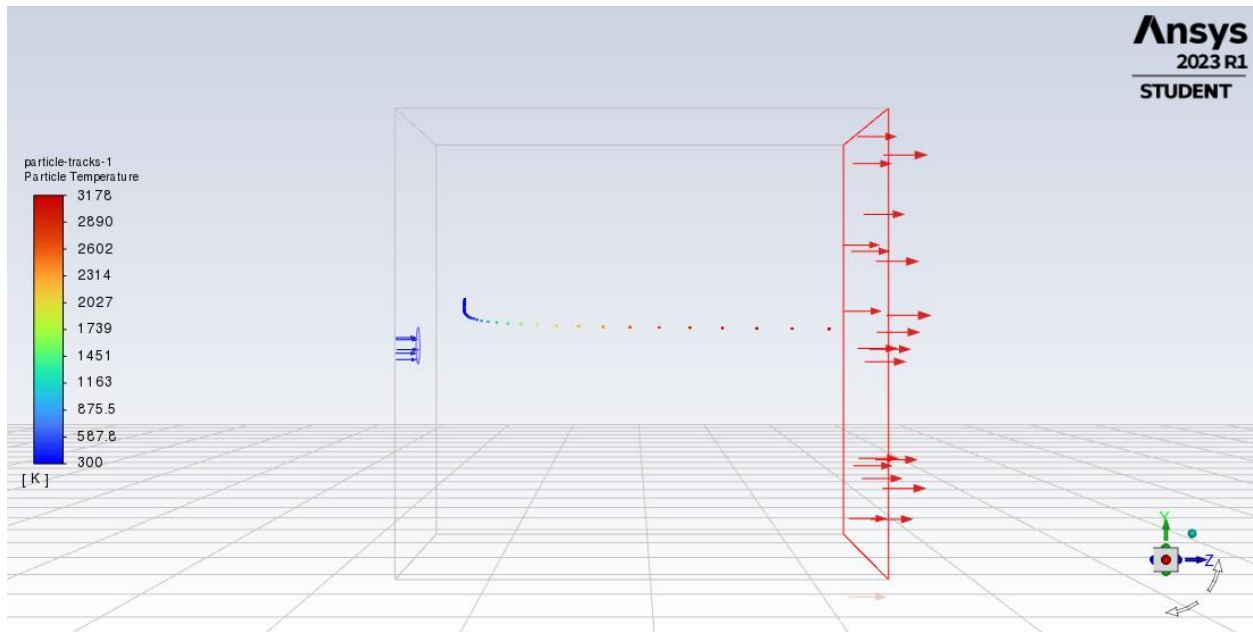


Figura 25: Trayectoria y perfil térmico de las partículas de 55 μm de diámetro obtenido mediante ANSYS Fluent.

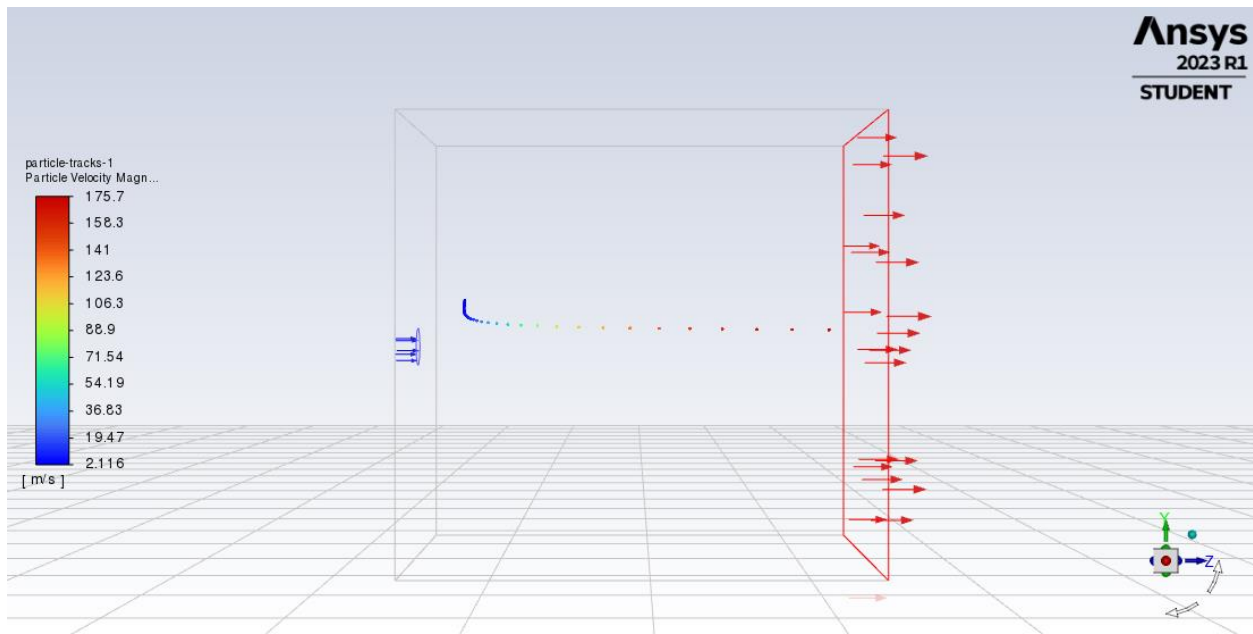


Figura 26: Trayectoria y perfil cinético de las partículas de 55 μm de diámetro obtenido mediante ANSYS Fluent.

Tanto los perfiles térmicos como los cinéticos ilustrados en las Figuras 22, 23, 24 y 25 permiten observar la coherencia presente en los resultados obtenidos mediante dos softwares distintos con

Jets&Poudres y *ANSYS Fluent*. Esta congruencia da paso a continuar el protocolo de simulación solo con *ANSYS Fluent* para proceder con el análisis de la trayectoria y propiedades termocinéticas.

La similitud en los perfiles termocinéticos entre ambos softwares y la trayectoria de las partículas a lo largo del jet hasta el sustrato evidencian que el protocolo de simulación establecido presenta resultados adecuados. En estos se permite analizar distintas propiedades tanto del jet como del flujo de partículas, permitiendo emular el proceso de proyección térmica vía plasma y alcanzando valores tanto de velocidad como de temperatura que son coherentes con lo reportado en la literatura actualmente [46]–[48]. Además, la posibilidad de obtener resultados que estén en el rango de lo reportado por la literatura abre camino a la Etapa 2, en la que se evalúa la incidencia de la potencia de la antorcha y el tamaño de partícula en la temperatura y velocidad de estas ejecutando los diseños experimentales presentados en las Tabla 3 Tabla 4 para posteriormente evaluar características morfológicas, porosidad y microdureza de las muestras de validación.

Es de resaltar que a partir de este protocolo de simulación es posible evaluar no solo la relación entre potencia y tamaño de partícula con la temperatura y velocidad de las partículas, sino también la relación entre otros parámetros del proceso de proyección térmica vía plasma como lo son la distancia de proyección, el flujo de inyección de partículas y los gases plasmógenos.

7.2. Resultados de los modelos de correlación de variables.

Una vez se cuenta con el protocolo de simulación previamente validado se ejecuta el diseño de experimentos explicado en la sección 5.2.

Para el primer conjunto de muestras se implementan 11 simulaciones que siguen las especificaciones de la Tabla 2, obteniendo de esta manera valores de velocidad y temperatura de partículas con 3 diferentes tamaños cuando estas llegan al plano de proyección. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Dada la naturaleza teórica de las simulaciones, los resultados de éstas se presentan sin desviaciones estándar ni tolerancias.

En la tabla Tabla 6: es posible observar que en la medida que se incrementa la potencia de la antorcha, tanto la temperatura (T_g) como la velocidad (V_g) del jet de plasma también incrementan

evidenciando la relación de dependencia directa entre el parámetro de entrada al sistema (potencia de la antorcha) y las características de la respuesta o salida (velocidad y temperatura del jet de plasma). Adicional a la dependencia directa de los factores mencionados, es posible observar que dicha dependencia tiene una relación lineal, como se ilustra en la Figura 27.

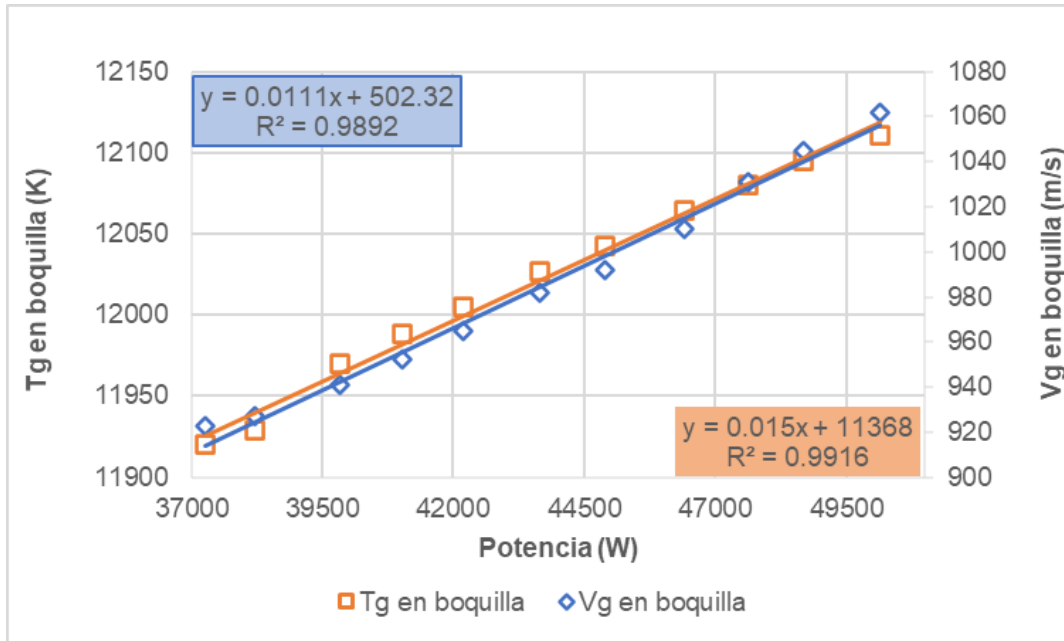


Figura 27: Dependencia de la temperatura y velocidad del jet de plasma frente a la potencia de la antorcha obtenida mediante Jets et Poudres

Tabla 6: Resultados teóricos de las simulaciones sobre el primer conjunto de muestras.

Muestra	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Jets et Poudres		ANSYS							
						Tp en plano de proyección (K)			Vp en plano de proyección (m/s)			Vp Prom (m/s)	Tp Prom (K)
				Tg en boquilla (K)	Vg en boquilla (m/s)	55 µm	80 µm	100 µm	55 µm	80 µm	100 µm		
A1	400	93.2	37266.6	11920	923	3395	2870	2634	154.8	127.4	120.3	178	2966
A2	412	92.8	38223	11929	927	3420	2905	2710	156	131.8	121	180	3012
A3	424	94.0	39846.6	11970	941	3465	2963	2739	156.2	134.9	121.7	182	3056
A4	436	94.1	41020.5	11988	952	3497	2972	2734	159.2	134.7	123.9	185	3068
A5	448	94.2	42196.8	12005	965	3515	2989	2706	162.6	137.6	124.3	188	3070
A6	460	94.9	43650.9	12027	982	3520	2970	2720	163.5	138.6	127.7	189	3070
A7	472	95.1	44886.3	12043	992	3501	2985	2696	166.1	141	127.5	191	3061
A8	484	95.9	46416.3	12064	1010	3505	2987	2715	167	142	131.1	193	3069
A9	496	96.0	47619	12080	1031	3507	2986	2718	168.1	142.4	133	194	3070
A10	508	95.8	48672	12095	1045	3520	2997	2716	170	143.7	134.3	196	3078
A11	520	96.4	50135.4	12111	1062	3509	2993	2717	171.4	144.2	135.6	197	3073

Los resultados de temperatura y velocidad de las partículas en el plano de proyección se analizan en la sección 6.3 con el objetivo de contrastar con los datos experimentales y verificar si existe una incidencia real en el perfil termocinético por parte de los cambios de potencia en el intervalo de trabajo de la antorcha SinplexPro.

Para el segundo conjunto de muestras, se evalúan 21 tamaños de partícula (como se presenta en la Tabla 3) y se extrae la temperatura y velocidad al llegar al sustrato. Los resultados se enseñan en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados del segundo conjunto de simulaciones.

ANSYS			
Muestra	Tamaño (µm)	Tp plano (K)	Vp plano (m/s)
B1	10	5565	318.4
B2	15	5206	278
B3	20	4890	247.1
B4	25	4586	221.3
B5	30	4334	203.6
B6	35	4134	191.5
B7	40	3968	182.5
B8	45	3782	172.1
B9	50	3624	164
B10	55	3503	156.2
B11	60	3373	152.4
B12	65	3274	148
B13	70	3188	144.3
B14	75	3071	138.5
B15	80	2972	134.7
B16	85	2912	131.4
B17	90	2828	127.3
B18	95	2793	126
B19	100	2734	123.9
B20	105	2667	119.8
B21	110	2612	117.2

A continuación, se ilustra la relación entre el tamaño de las partículas con su temperatura y velocidad (ver Figura 28) con el fin de comprender el comportamiento de las variables e identificar

si existe alguna correlación entre estas. También se señala la temperatura de fusión (línea verde punteada) y temperatura de vaporización (línea roja punteada) del YSZ.

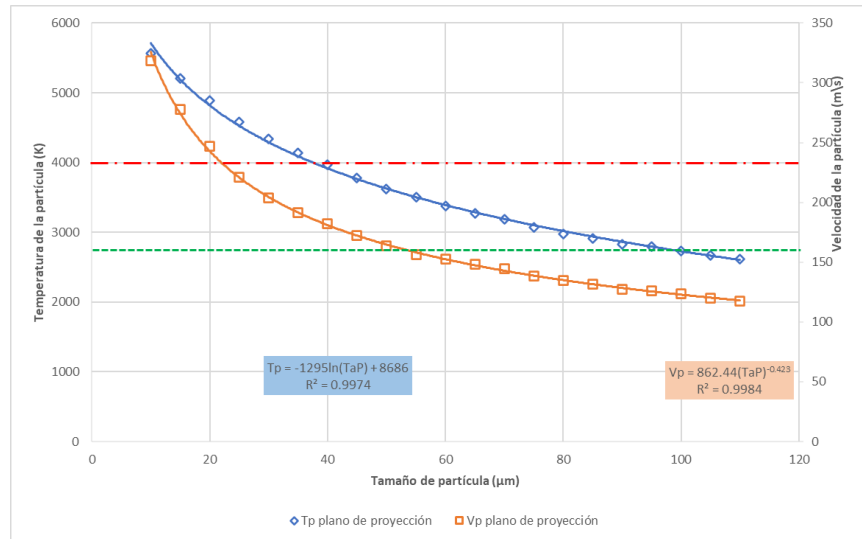


Figura 28: Relación entre el tamaño de las partículas (TaP) con su temperatura (Tp) y velocidad (Vp) obtenidas mediante ANSYS Fluent.

Observando los resultados presentados se evidencia el decaimiento en el perfil termocinético al llegar al sustrato a medida que aumenta el tamaño de partícula. Teniendo en cuenta que el punto de vaporización reportado del YSZ es cercano a los 4000K [49] bajo estos parámetros de proyección (potencia, distancia hasta el sustrato, mezclas de gases, principalmente) las partículas con diámetros inferiores a 40 µm no alcanzan a llegar al sustrato ya que se vaporizarían por las altas temperaturas. Esto implica pérdida de material si no se tiene control del tamaño del material que se está inyectando.

De igual manera la inercia propia de una partícula de más masa hace que llegue más lenta al sustrato, lo que podría incidir en las características morfológicas, la porosidad y dureza del recubrimiento. Una partícula más lenta (y con menor temperatura) puede llegar a ocasionar recubrimientos más porosos y menos duros [50]. Esto se verificará en la sección 7.3 de este documento cuando se analicen las caracterizaciones realizadas a las muestras proyectadas.

Los modelos teóricos basados en simulaciones para representar el proceso APS pueden brindar una herramienta predictiva para el funcionamiento de la antorcha según las necesidades para cada recubrimiento.

7.3. Resultados de la validación experimental.

Así como en el numeral anterior, los resultados de esta etapa se dividen en 2 de acuerdo con el parámetro de control a evaluar.

Para el primer conjunto de muestras en el que se evalúa la incidencia de la potencia, se adquieren los datos experimentales que faciliten la verificación del modelo de correlación arrojado por las simulaciones, estos se presentan en la

Tabla 8 y se grafican en las Figura 30 donde se puede evidenciar que, en el rango de trabajo de la antorcha, las variaciones en potencia generan cambios máximos en temperatura y velocidad de la partícula de 107K y 16 m/s, respectivamente.

Según las simulaciones, la temperatura con la que las partículas llegan al sustrato presenta ligeras variaciones una vez se superan los 39 kW, por lo que, si se deseara generar alteraciones microestructurales en el recubrimiento mediante el calentamiento del material, incrementar los valores de potencia no produciría cambios representativos. Es posible asignar la misma interpretación a la gráfica de velocidad, ya que el aumento de la potencia no conduce a que las partículas adquieran un momentum significativo.

Tabla 8: Resultados teóricos y experimentales de la validación del primer conjunto de muestras.

Muestra	Potencia (W)	ANSYS							Experimental		
		Tp en plano (K)			Vp en plano (m/s)			Tp promedio (K)	Vp promedio (m/s)	Tp promedio (K)	Vp promedio (m/s)
		55 μm	80 μm	100 μm	55 μm	80 μm	100 μm				
A1	37266.6	3395	2870	2634	154.8	127.41	120.3	2966	178	2923 \pm 13.4	203 \pm 2.1
A2	38223	3420	2905	2710	156	131.8	121	3012	180	2933 \pm 17.3	203 \pm 1.9
A3	39846.6	3465	2963	2739	156.2	134.9	121.7	3056	182	2963 \pm 15.6	210 \pm 2.4
A4	41020.5	3497.4	2972	2734	159.2	134.7	123.9	3068	185	2983 \pm 14.8	212 \pm 2.2
A5	42196.8	3515	2989	2706	162.6	137.6	124.3	3070	188	3013 \pm 19.3	222 \pm 2.0
A6	43650.9	3520	2970	2720	163.5	138.6	127.7	3070	189	3033 \pm 18.7	220 \pm 3.1
A7	44886.3	3501	2985	2696	166.1	141	127.5	3061	191	3023 \pm 17.6	225 \pm 2.8
A8	46416.3	3505	2987	2715	167	142	131.1	3069	193	3026 \pm 19.2	219 \pm 3.3
A9	47619	3507	2986	2718	168.1	142.4	133	3070	194	3033 \pm 18.3	227 \pm 3.5
A10	48672	3520	2997	2716	170	143.7	134.3	3078	196	3043 \pm 15.7	233 \pm 3.2
A11	50135.4	3509	2993	2717	171.4	144.2	135.6	3073	197	3033 \pm 17.4	234 \pm 3.4

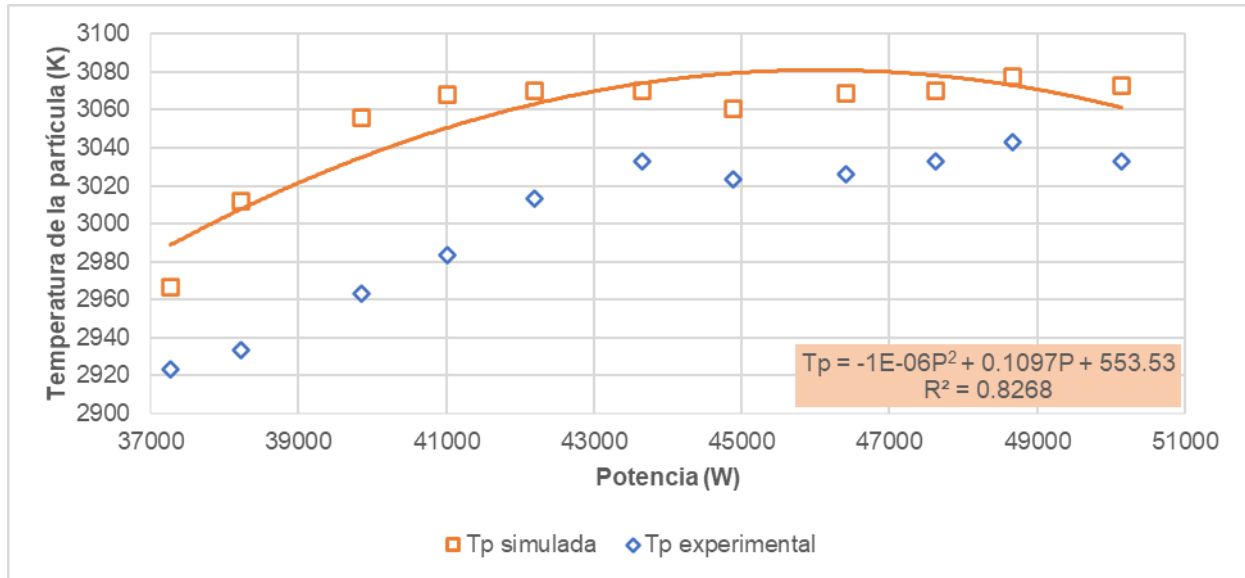


Figura 29: Relación entre la potencia de la antorcha con la Temperatura de las partículas en el plano de proyección obtenida teóricamente mediante ANSYS Fluent y experimentalmente mediante los sensores AccuraSpray.

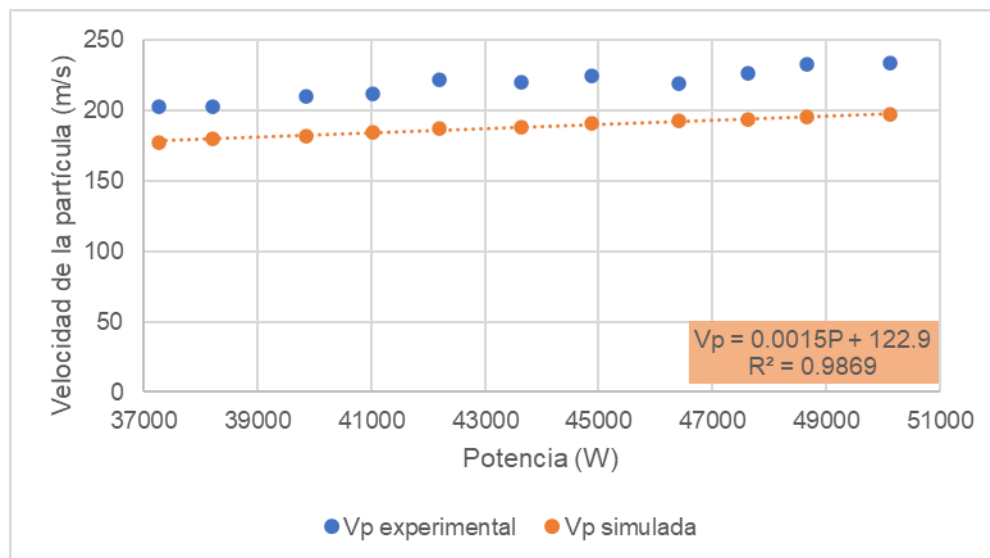


Figura 30: Relación entre la potencia de la antorcha con la velocidad de las partículas en el plano de proyección obtenida teóricamente mediante ANSYS Fluent y experimentalmente mediante los sensores Accuraspray.

En la validación experimental se puede identificar un comportamiento con altas similitudes para cada modelo de correlación de acuerdo con lo previsto en los resultados provenientes de las

simulaciones, sin embargo, se presentan diferencias principales, las cuales se enlistan a continuación:

- El perfil cinético experimental presenta un desplazamiento vertical de 25 m/s aproximadamente. A pesar de tener un comportamiento altamente similar, la velocidad experimental media fue mayor. Esto se podría adjudicar a varios motivos: falta de control de la atmósfera en el modelo computacional, diferencias en el limitado número de tamaños de partícula medidos en la simulación frente a la distribución de tamaños que registra el AccuraSpray y la incidencia del modelo de turbulencia.
- El perfil térmico experimental presenta un crecimiento más acelerado, encontrando estabilidad alrededor de los 43 kW, mientras el teórico alcanza un comportamiento estable a los 40 kW. Esto puede argumentarse en las diferencias de composición del plasma entre el modelo teórico y el experimental. Variaciones en las mezclas de gases plasmógenos generan modificaciones en los coeficientes de conductividad térmica. También se debe tener en cuenta que en el perfil experimental se toman valores medios de distribuciones de tamaño mientras que el promedio teórico solo incluye partículas de 55, 80 y 100 μm , lo que puede explicar las diferencias en los resultados.

Análisis estadístico de los modelos teóricos obtenidos:

Para determinar si el modelo obtenido es capaz de representar y predecir con precisión los datos experimentales, se realiza un análisis estadístico que evalúa en primera instancia la significancia de los coeficientes del modelo teórico obtenido a partir de datos de simulaciones computacionales, tanto para la relación Temperatura-Potencia como para la relación Velocidad-Potencia. Una vez que se ha verificado esta significancia, se procede a calcular la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés, Root Mean Square Error) entre los valores teóricos proporcionados por el modelo y los valores experimentales. Este resultado representa la desviación estándar de los residuos (es decir, los errores de predicción del modelo). Utilizando esta medida, se puede evaluar la capacidad del modelo teórico obtenido para predecir con precisión los datos experimentales.

Para el análisis de significancia se ejecuta una prueba de hipótesis para cada coeficiente, en donde la hipótesis nula es que este es igual a 0, lo que haría que la variable dependiente (Temperatura de la partícula o velocidad de la partícula) no se vea afectada por el término

evaluado. Por el contrario, la hipótesis alternativa plantea que el coeficiente es diferente de cero, asegurando la dependencia de la variable por este término. Para la prueba de hipótesis se establece un nivel de confianza del 95 %, por lo que el parámetro α (llamado significancia predefinida y el se define como: $1 - \text{nivel de confianza}$) es de 0.05. Si el valor de significancia observado no supera el de significancia predefinida, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa.

En la Tabla 9 se presentan los modelos teóricos para temperatura y velocidad obtenidos a partir de datos provenientes de las simulaciones realizadas con ANSYS Fluent, en los que se analiza por separado cada coeficiente con sus respectivas significancias observadas y las cuales fueron calculadas con el software estadístico R™.

Tabla 9: Análisis de significancia para los coeficientes.

Relación	Modelo teórico	Significancia del coeficiente cuadrático	Significancia del coeficiente lineal	Significancia del intercepto
$Tp \text{ vs } P$	$Tp = -1 \times 10^{-6}P^2 + 0.1097P + 553.53$	0.00673	0.00506	0.04
$Vp \text{ vs } P$	$Vp = 0.0015P + 122$	-	2.74×10^{-9}	9.8×10^{-12}

Dado que todas las significancias observadas en los coeficientes son menores a la significancia predefinida (0.05), se pueden rechazar las hipótesis nulas, lo cual garantiza que tanto la temperatura como la velocidad dependen de la potencia en proporción a sus coeficientes.

La idoneidad del modelo teórico para predecir resultados se evalúa mediante la raíz del error cuadrático medio de los datos obtenidos a partir del sistema de sensores AccuraSpray que se contrastan con dicho modelo teórico. Para esto se aplica la ecuación (20), donde \widehat{y}_n representa el valor experimental, y_n el valor del modelo teórico y N es el número de datos evaluados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\widehat{y}_n - y_n)^2}{N}} \quad (20)$$

Con esta ecuación se obtienen los resultados presentados en la Tabla 10.

Tabla 10: Análisis de error cuadrático medio para los modelos teóricos obtenidos mediante ANSYS Fluent.

Relación	Modelo teórico	RMSE
T_p vs P	$T_p = -1 \times 10^{-6} P^2 + 0.1097P + 553.53$	54.6 K
V_p vs P	$V_p = 0.0015P + 122$	13.5 $\frac{m}{s}$

De esta manera se determina que el modelo para la relación entre temperatura de partícula y potencia tiene una desviación estándar de los residuales de 54.6K, lo cual representa el 1.8 % de error en predicciones frente a los datos experimentales. Por su parte para el modelo teórico de la relación entre velocidad de partícula y potencia de la antorcha se identifica una desviación estándar de los residuales de 13.5 m/s, encontrando así un error de predicción de 7.4 %.

En conclusión, los modelos de correlación para la potencia se validan experimentalmente, a través de la identificación de los errores de predicción que corresponden al rango de trabajo de la antorcha Sinplex Pro.

Para la validación de los resultados teóricos del segundo conjunto de muestras se realizan caracterizaciones microestructurales, de porosidad y de microdureza que permiten identificar la relación entre cambios de tamaño de partícula y el perfil termocinético de las partículas al momento de estructurar el recubrimiento.

- Análisis microestructural:

Para cada tamaño de polvo proyectado, reportado en la Tabla 5, se realiza un análisis microscópico usando imágenes de MEB tomadas a 2000X con el fin de explicar las posibles características microestructurales de los recubrimientos que se puede anticipar a partir de resultados termocinéticos obtenidos como producto de las simulaciones. Para ello, a través de MEB se observa el perfil superior de las tres muestras proyectadas (además del perfil de la sección transversal de los recubrimientos para el posterior análisis de porosidad). En la Figura 31 se puede apreciar la vista superior de la muestra E1.

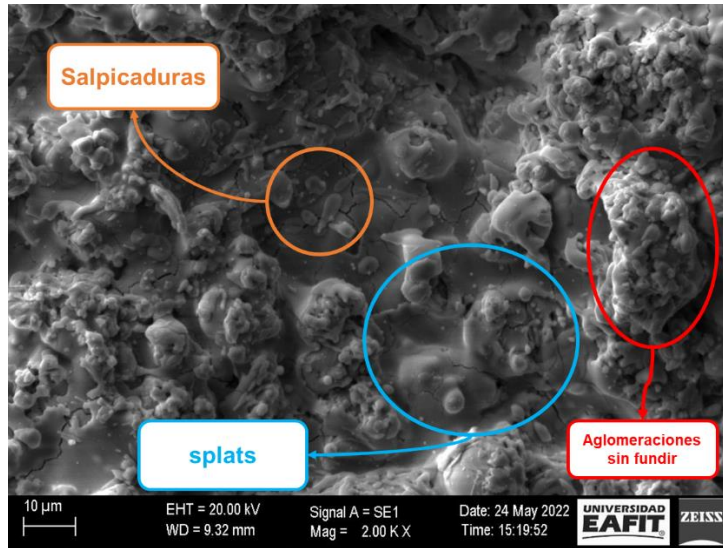


Figura 31: Vista superior de la muestra E1 a 2000X.

La microestructura de este recubrimiento está constituida por salpicaduras, como se presenta en la Figura 31 encerrados en color naranja, los cuales dan evidencia de partículas que llegan con una mezcla de temperaturas y velocidades muy altas, posiblemente con tamaños iniciales entre 25 y 60 µm, lo cual concuerda con la distribución de tamaño de partícula del polvo inicial (ver Figura 17), puesto que son pequeñas y alcanzan valores termocinéticos que superan valores que permitan formar splats.

También se pueden identificar (encerrado en color azul celeste) ciertas zonas en las que se formó recubrimiento idóneamente con la llegada al sustrato de partículas con temperaturas superiores al punto de fusión, pero inferiores al punto de vaporización y con momentum suficiente para adherirse sin generar salpicaduras, estas partículas pueden estar entre 60 y 100 µm según el modelo predictivo de la Figura 28.

Por último, en rojo se señalan las zonas de partículas sin fundir en las que priman las aglomeraciones evidencia de la retención de la estructura de partida de los polvos, razón por la cual se dificulta la transferencia de calor y por ende la fusión completa de las partículas para formar el recubrimiento.

La Figura 32, presentada a continuación, ilustra el perfil superior de la muestra E2.

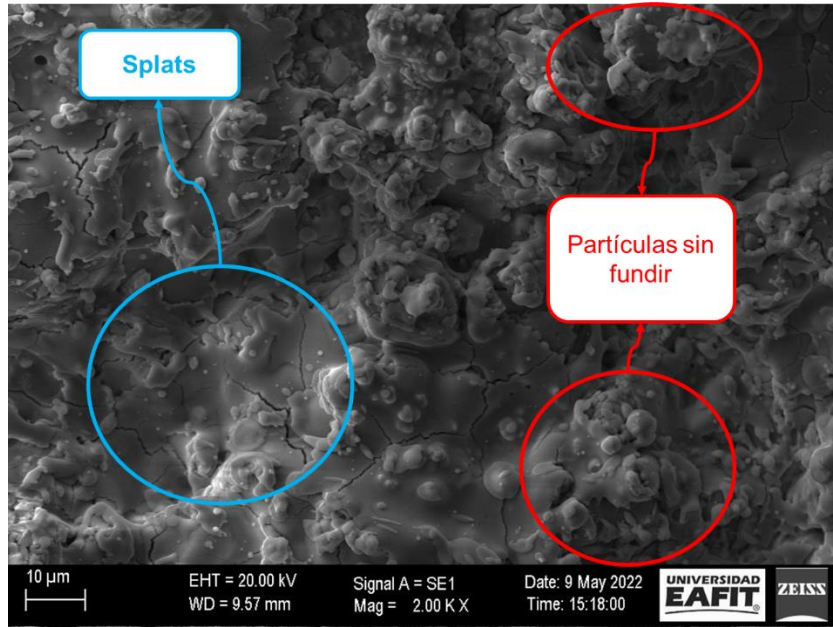


Figura 32: Perfil superior de la muestra E2 a 2000X.

A diferencia de la muestra anterior, en este recubrimiento se pueden identificar más splats, lo que da a entender que un porcentaje del material particulado mayor adquirió temperatura y velocidad necesaria para fundirse y adherirse al sustrato sin sobrepasar valores que conlleven a salpicaduras o incluso a vaporización del material. Esto puede adjudicarse al aumento en el tamaño de partícula que se inyecta, puesto que estas pueden llegar menos calientes que las más pequeñas. Sin embargo, este aumento en el tamaño también causa que haya más partículas sin fundir, como se evidencia en las zonas encerradas en rojo.

Por último, se presenta en la Figura 33, la microestructura de la muestra E3 a 2000 X.

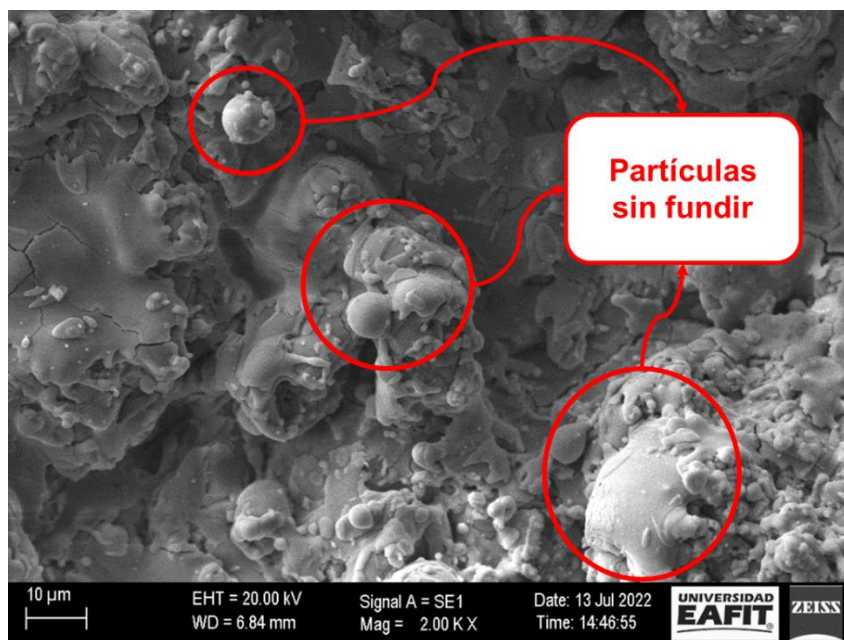


Figura 33: Perfil superior de la muestra E3 a 2000X.

La inercia termocinética propia de partículas más masivas hace que a medida que el diámetro aumente la temperatura y velocidad con la que lleguen al sustrato sea menor, lo cual propicia una reducción en salpicaduras, propias de partículas excesivamente calientes y a su vez un aumento en partículas carentes de la suficiente energía para fundirse y adherirse al sustrato.

- Porosidad:

Para el análisis de porosidad se usa la imagen microscópica del perfil transversal de cada muestra y aplicando la norma ASTM E2109, se logran obtener los datos presentados la Tabla 11.

Tabla 11: Resultados de porosidad en la sección transversal de las muestras E1, E2 y E3.

Muestra	Tamaño de partículas de polvos de partida			Porosidad [%]
	d10 (μm)	d50 (μm)	d90 (μm)	
E1	15.8	24.3	37.9	9.5 ± 1.9
E2	25.9	43.3	69.9	11.9 ± 1.7
E3	30.5	62.2	110.3	12.9 ± 2.7

La muestra E1, elaborada a partir de las partículas de diámetro más pequeño, presenta un valor de porosidad más bajo que las muestras E2 y E3, lo cual puede deberse a que a medida que el polvo inyectado es más grande, la transferencia termocinética del plasma al material particulado es menos eficiente debido a la inercia térmica propia de materiales más masivos; lo que conlleva a tener partículas menos calientes y más lentas al llegar al sustrato y, por lo tanto, los recubrimientos quedan constituidos de partículas sin fundir o parcialmente fundidas obteniendo estructuras más porosas. Esto es coherente con el modelo de correlación entre tamaño de partícula y temperatura-velocidad, obtenidos mediante la simulación computacional y presentados en la Figura 28, en el que se observa que las partículas más grandes adquieren menor velocidad y temperatura.

- Microdureza:

En primera instancia se construye la curva de calibración que permita identificar la carga de indentación idónea para evaluar la dureza en este material. Para eso, se realizan 10 indentaciones por carga desde 100 g hasta 1 kg y se miden las diagonales de las huellas con cuyos valores se calcula la dureza usando la Ecuación 19. El comportamiento de los datos obtenidos aparece graficado en la Figura 34.

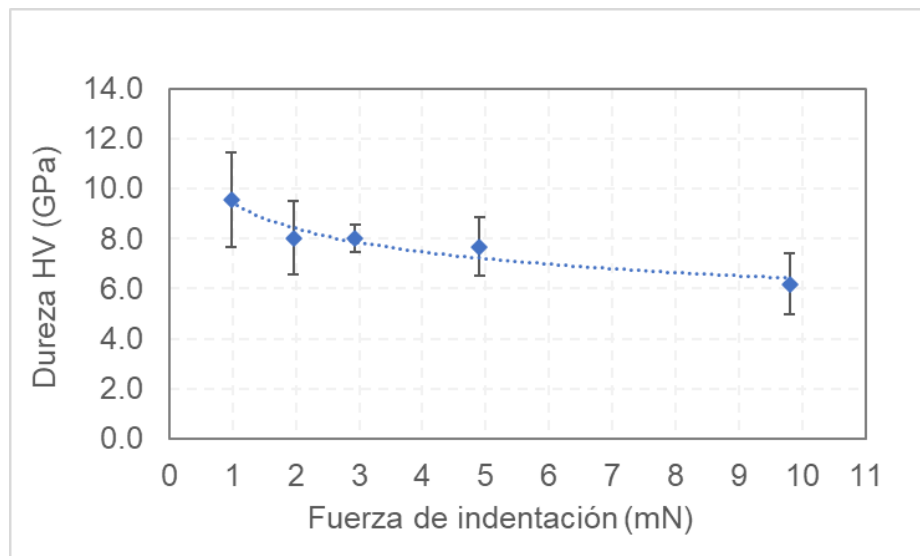


Figura 34: Curva de calibración para el cálculo de dureza de las muestras E1, E2 y E3.

Al identificar la zona en la que se estabiliza la curva se selecciona la carga de 500 g (4.9 mN) para indentar las tres muestras y obtener sus valores de dureza transversal aplicando la Ecuación 19. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados de la caracterización de dureza transversal para las muestras E1, E2 y E3.

Muestra	Tamaño de partículas de polvos de partida			Carga aplicada (g)	Dureza transversal (GPa)
	d10 (µm)	d50 (µm)	d90 (µm)		
E1	15.8	24.3	37.9	500	10.1 ± 1.8
E2	25.9	43.3	69.9		7 ± 1.4
E3	30.5	62.2	110.3		8 ± 0.5

Los valores de microdureza obtenidos están en el rango de los reportados por la literatura para el material proyectado, es decir, entre 6 y 13 GPa [50], [51]. La muestra E1 se presenta como la de mayor dureza de las tres evaluadas, lo cual puede estar relacionado con sus valores de porosidad, ya que esta muestra fue la que presentó las menores porosidades y por lo tanto es la más compacta.

Teniendo en cuenta que este recubrimiento se elabora a partir de polvos con partículas más pequeñas, valores de porosidad bajos y de dureza altos sugieren que la transferencia de calor y momentum entre el jet de plasma y las partículas es más eficiente en la medida que estas tienen un diámetro menor. Material particulado que llega con altas temperaturas y velocidades genera recubrimientos más densos, a partir de partículas fundidas, lo cual está representado en porosidades más bajas y a su vez durezas mayores.

8. CONCLUSIONES

1. Se desarrolla un protocolo de simulación computacional del fenómeno APS que permite identificar los modelos de correlación entre la potencia eléctrica de la antorcha Sinplex Pro y las variables termocinéticas de las partículas.
2. Usando herramientas estadísticas como pruebas de hipótesis, análisis de residuales y cálculos de error cuadrático medio se prueba que el protocolo de simulación implementado describe el comportamiento de los parámetros de proyección térmica vía plasma además de predecir la temperatura y velocidad de las partículas inyectadas al momento de llegar al sustrato con errores promedio de 1.8 % para el perfil térmico y 7.4 % para el perfil cinético, a partir de los modelos matemáticos de transferencia de calor y momentum que definen estos fenómenos físicos.
3. La porosidad y microdureza de los recubrimientos de YSZ se ven moduladas por el tamaño de partícula del polvo de partida proyectado bajo las condiciones experimentales empleadas en este estudio. Material particulado de diámetros pequeños (del orden de 24 μm) conducen a obtener recubrimientos más compactos con porosidades del orden del 9 % y durezas de 10 GPa; a medida que se incrementa el tamaño de las partículas inyectadas al jet, la inercia termocinética de las mismas hace que su temperatura y velocidad al llegar al sustrato sea menor, formando recubrimientos con más espacios vacíos, más porosos (entre 10 y 16 % de porosidad) y con menor dureza (entre 5.6 y 8.5 GPa).
4. A partir de los modelos de correlación obtenidos y la validación experimental, se sugiere establecer que el tamaño de partículas inyectadas constituye un parámetro de control para regular la porosidad y dureza de los recubrimientos. Ligeras variaciones en el diámetro de las partículas ingresadas generan cambios significativos en el perfil termocinético de las partículas al llegar al sustrato, lo que conlleva a variaciones en la porosidad y microdureza de la muestra. Por el contrario, variaciones en la corriente que genera cambios en la potencia de la antorcha APS (del orden de 15 kW) no producen cambios representativos en la temperatura y velocidad de las partículas, lo que dificulta la obtención de recubrimientos con porosidades diferentes a través de este parámetro.
5. El protocolo de simulación elaborado no tiene en cuenta características como la porosidad o la aglomeración de partículas, lo que conduce a experimentar diferencias en los resultados de las simulaciones ejecutadas mediante los modelos termocinéticos predictivos en

contraste con los resultados de la validación experimental. La inclusión de un módulo de simulación para inyectar partículas de distintos tamaños con características morfológicas propias acercaría más los perfiles termocinéticos teóricos a valores experimentales.

6. La combinación de simulaciones computacionales, el proceso de proyección y la validación con el sistema AccuraSpray G3C se convierte en una herramienta muy valiosa para mejorar el proceso de fabricación de recubrimientos, optimizar parámetros de proyección y lograr una calidad adecuada en los recubrimientos para una amplia variedad de aplicaciones. Esta herramienta permite identificar los rangos de operación de la antorcha en los que se puede obtener el máximo aprovechamiento de los materiales utilizados, predecir la calidad y propiedades de los recubrimientos mediante la correlación de estas propiedades con los parámetros de las partículas en vuelo. En resumen, esta combinación de herramientas es de gran utilidad para optimizar el proceso de fabricación de recubrimientos y mejorar la calidad de estos en diferentes aplicaciones.
7. Se identifica la viabilidad para estudiar fenómenos de proyección térmica a partir de paquetes de softwares comerciales como ANSYS Fluent que brindan la posibilidad de evaluar distintos parámetros de proyección y su influencia en las características termocinéticas de las partículas en vuelo a partir de la inclusión de módulos de análisis de trayectoria, mezclas de fases y un correcto manejo de las condiciones de frontera. Sin embargo, este software aún no permite estudiar la formación del recubrimiento directamente ni la transformación de potencia eléctrica en temperatura y velocidad del jet de plasma, por lo que, si se requiere un análisis completo del fenómeno APS se debe acompañar con el uso de otro tipo de programas.

9. PERSPECTIVAS/TRABAJO FUTURO

- Con el objetivo de ahondar en la investigación, se sugiere incorporar al protocolo de simulación un módulo de mezcla de gases que permita el estudio de la influencia de los gases plasmógenos en la microestructura de los recubrimientos.
- Aplicar el protocolo diseñado para evaluar otros parámetros, como la distancia de proyección o la geometría de la antorcha para ampliar el conocimiento sobre la técnica APS.
- Realizar caracterizaciones de porosidad y microdureza a las muestras proyectadas con distintas potencias para evidenciar directamente la influencia de este parámetro en estas características microestructurales.
- Ejecutar proyecciones con polvos tamizados de manera más fina, con el objetivo de validar experimentalmente los modelos de correlación (tamaño de partícula -temperatura y tamaño de partícula - velocidad) construidos. De esta manera se reduce el margen de error propio de una distribución de tamaño de partícula amplia.
- Implementar caracterizaciones distintas a porosidad y microdureza para estudiar la influencia de los parámetros de control del proceso APS en otras propiedades de los recubrimientos.

10. REFERENCIAS

- [1] P. ABELARD Professeur *et al.*, “Spécialité : Matériaux Céramiques et Traitements de Surface Contribution à l’Etude des Propriétés Optiques de Dépôts Plasma de Zircon Yttrée : Influences de leurs Caractéristiques Microstructurales et Physico-chimiques. INVITES N. CARON,” 2000.
- [2] E. Pfender, “FUNDAMENTAL STUDIES ASSOCIATED WITH THE PLASMA SPRAY PROCESS*,” 1988.
- [3] D. S. Lee *et al.*, “Microstructural evolution and mechanical properties of atmospheric plasma sprayed Y2O3 coating with state of in-flight particle,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 3, pp. 3853–3866, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.246.
- [4] S. Karthikeyan, V. Balasubramanian, and R. Rajendran, “Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings,” *Ceram Int*, vol. 40, no. 2, pp. 3171–3183, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.09.125.
- [5] M. I. Boulos, P. L. Fauchais, and J. V. R. Heberlein, *Thermal Spray Fundamentals*. 2021. doi: 10.1007/978-3-030-70672-2.
- [6] “Thermal Spray Coatings Market, Industry Size Forecast, [Latest].” <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/thermal-spray-coating-market-181347083.html> (accessed Apr. 07, 2023).
- [7] “Thermal Spray Market Size & Share Analysis - Industry Research Report - Growth Trends.” <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/thermal-spray-market> (accessed Apr. 07, 2023).
- [8] A. Vardelle *et al.*, “The 2016 Thermal Spray Roadmap,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25, no. 8. Springer New York LLC, pp. 1376–1440, Dec. 01, 2016. doi: 10.1007/s11666-016-0473-x.
- [9] F. Vargas, J. Rapporteurs, and D. Chicot, “UUIVERSITÉ D’AATIOQUIA FACULTÉ d’Ingénierie THÈSE EN COTUTELLE Discipline / Spécialité : Matériaux

Céramiques et Traitements de Surface Thèse dirigée par Hélène AGEORGES, María E. LÓPEZ et Pierre FAUCHAIS Élaboration de couches céramiques épaisses à structures micrométriques et nanométriques par projections thermiques pour des applications tribologiques,” 2010.

- [10] L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. 2008. doi: 10.1002/9780470754085.
- [11] P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, and L. Bianchi, “Plasma spray: Study of the coating generation,” *Ceram Int*, vol. 22, no. 4, pp. 295–303, 1996, doi: 10.1016/0272-8842(95)00106-9.
- [12] A. Nouri and A. Sola, “Powder morphology in thermal spraying,” *J Adv Manuf Process*, vol. 1, no. 3, Jul. 2019, doi: 10.1002/amp2.10020.
- [13] P. Fauchais and A. Vardelle, “Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 39, no. 9–11, pp. 852–870, 2000, doi: 10.1016/S1290-0729(00)01195-9.
- [14] M. Stummer and N. Enzinger, “Cfd Simulation of Particle Movement During Atmospheric Plasma Spraying,” *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 12*, pp. 1–11, 2019.
- [15] M. Shigeta, “Modeling and simulation of a turbulent-like thermal plasma jet for nanopowder production,” *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 1. pp. 16–28, 2019. doi: 10.1002/tee.22761.
- [16] S. Dyshlovenko, L. Pawlowski, B. Pateyron, I. Smurov, and J. H. Harding, “Modelling of plasma particle interactions and coating growth for plasma spraying of hydroxyapatite,” *Surf Coat Technol*, vol. 200, no. 12–13, pp. 3757–3769, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.04.002.
- [17] G. Delluc, G. Mariaux, A. Vardelle, and B. Pateyron, “A numerical tool for plasma spraying. Part I: modelling of plasma jet and particle behaviour”.

- [18] S. J. Brookes, "Soot Production and Thermal Radiation from Turbulent Jet Diffusion Flames," 1996. Accessed: Aug. 10, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1826/3558>
- [19] I. J. Moncho, "Caracterización hidrodinámica y procesos de mezcla en un depósito de agua potable mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD)," Universitat Politècnica de València, Valencia, 2011.
- [20] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 15. Discrete Phase." <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node238.htm> (accessed Apr. 17, 2022).
- [21] "ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.2.2 Mesh Quality." <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm> (accessed Apr. 13, 2022).
- [22] N. Ashgriz and J. Mostaghimi, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics Chapter 20 in Fluid Flow Handbook," 2002.
- [23] J. Anderson, G. Degrez, J. Degroote, E. Dick, R. Grundmann, and Vierendeels. J, *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*, 2009th ed. Springer, 1996.
- [24] R. S. Cant, S. B. Pope, and R. K. N. C. Bray, "MODELLING OF FLAMELET SURFACE-TO-VOLUME RATIO IN TURBULENT PREMIXED COMBUSTION," 1990.
- [25] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition." [Online]. Available: www.pearsoned.co.uk/versteeg
- [26] J. Anderson, G. Degrez, J. Degroote, E. Dick, R. Grundmann, and Vierendeels. J, *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*, 2009th ed. Springer, 1996.
- [27] "Turbulence models in CFD - RANS, DES, LES and DNS." <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/> (accessed Aug. 15, 2022).

- [28] M. Hajdukiewicz, M. Geron, and M. M. Keane, "Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments," *Build Environ*, vol. 59, pp. 290–302, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2012.08.027.
- [29] B. Blocken, "Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations," *Build Environ*, vol. 91, pp. 219–245, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.02.015.
- [30] H. Montazeri and B. Blocken, "CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis," *Build Environ*, vol. 60, pp. 137–149, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2012.11.012.
- [31] B. Blocken, "50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 129, pp. 69–102, 2014, doi: 10.1016/J.JWEIA.2014.03.008.
- [32] R. Bolot, J. Li, and C. Coddet, "Some key advices for the modeling of plasma jets using FLUENT," *Thermal Spray 2005: Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, vol. 5, no. September, pp. 1367–1371, 2005.
- [33] R. Bolot, J. Li, and C. Coddet, "Modeling of thermal plasma jets: A comparison between Phoenics and Fluent," *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, pp. 764–769, 2004.
- [34] J. A. Lewis and W. H. Gauvin, "Motion of particles entrained in a plasma jet," *AIChE Journal*, vol. 19, no. 5, pp. 982–990, 1973, doi: 10.1002/aic.690190515.
- [35] F. Ben Ettouil, B. Pateyron, H. Ageorges, M. El Ganaoui, P. Fauchais, and O. Mazhorova, "Fast modeling of phase changes in a particle injected within a d.c plasma jet," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 16, no. 5–6, pp. 744–750, Dec. 2007, doi: 10.1007/S11666-007-9075-Y.
- [36] H. Ageorges *et al.*, "A numerical tool for plasma spraying. Part II : model of statistic distribution of alumina multi particle powder Solution precursor plasma sprayed

- oxide coatings View project Optimization studies in energies and materials View project A numerical tool for plasma spraying. Part II: Model of statistic distribution of alumina multi particle powder,” 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261991319>
- [37] “Jets&Poudres.” <http://jets.poudres.free.fr/en/home.html> (accessed Oct. 10, 2022).
- [38] “Jets&Poudres.” <http://jets.poudres.free.fr/en/motionparticles.html> (accessed Aug. 15, 2022).
- [39] D. Cheng, G. Trapaga, J. W. McKelliget, and E. J. Lavernia, “Mathematical modelling of high velocity oxygen fuel thermal spraying of nanocrystalline materials: An overview,” *Model Simul Mat Sci Eng*, vol. 11, no. 1, 2003, doi: 10.1088/0965-0393/11/1/201.
- [40] M. Ferrer, F. Vargas, and G. Pena, “Optimization of the parameters for obtaining zirconia-alumina coatings, made by flame spraying from results of numerical simulation,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012023.
- [41] L. Rodríguez, M. Ferrer, F. Vargas, and G. Peña, “Projection parameters for zirconia-alumina-ceria coatings made by flame spraying from results of numerical simulation,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012022.
- [42] E. Cadavid and F. Vargas, “ESTUDIO DE LLAMAS OXIACETILÉNICAS USADAS EN LA PROYECCIÓN TÉRMICA,” 2016.
- [43] *Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings - ASTM E2109*. 2007. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: www.astm.org,
- [44] “Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics 1.” [Online]. Available: www.astm.org,

- [45] "Accuraspray 4.0 - One sensor for all processes | Tecnar spray sensors." <https://spraysensors.tecnar.com/thermal-spray/accuraspray-4-0/> (accessed Mar. 05, 2023).
- [46] R. C. Batra and U. Taetragool, "Numerical techniques to find optimal input parameters for achieving mean particles' temperature and axial velocity in atmospheric plasma spray process," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78424-w.
- [47] D. S. Lee *et al.*, "Microstructural evolution and mechanical properties of atmospheric plasma sprayed Y2O3 coating with state of in-flight particle," *Ceram Int*, vol. 47, no. 3, pp. 3853–3866, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.246.
- [48] K. Bobzin *et al.*, "Simulation of the Particle Melting Degree in Air Plasma Spraying," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/825/1/012002.
- [49] Oerlikon Metco, "Material Product Data Sheet DSM-0242.5_8YO_ZrO_HOSP," 2022
- [50] S. Karthikeyan, V. Balasubramanian, and R. Rajendran, "Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings," *Ceram Int*, vol. 40, no. 2, pp. 3171–3183, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.09.125.
- [51] S. Nath, I. Manna, and J. D. Majumdar, "Nanomechanical behavior of yttria stabilized zirconia (YSZ) based thermal barrier coating," *Ceram Int*, vol. 41, no. 4, pp. 5247–5256, May 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.11.039.
- [52] "An Internet Book on Fluid Dynamics Oseen Flow".