



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELAMIENTO FLUIDODINÁMICO DEL EFECTO DE LA ALIMENTACIÓN DE
PARTÍCULAS EN EL PERFIL DE DEPOSICIÓN EN COLD SPRAY EN UNA TOBERA
PLANA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CRISTIÁN ANDRÉS VERA SUÁREZ

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: CRISTIÁN ANDRÉS VERA SUÁREZ
FECHA: 06 DE ABRIL DE 2020
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MODELAMIENTO FLUIDODINÁMICO DEL EFECTO DE LA ALIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN EL PERFIL DE DEPOSICIÓN EN COLD SPRAY

Cold Spray es un proceso de manufactura aditiva que consiste principalmente en la deposición de partículas a alta velocidad -velocidades supersónicas- en un sustrato. Esto se logra mediante un gas a alta presión que circula por el interior de una tobera De Laval convergente-divergente que se encarga de acelerar el fluido. Por tanto, partículas de metal son arrastradas mediante este flujo, las cuales impactan el sustrato y se depositan mediante deformación plástica en éste.

En este trabajo de título se analiza el efecto en el perfil de deposición ante cambios en la alimentación de partículas, específicamente, modificando el ángulo de inclinación del alimentador de partículas, se utilizan tres distintas configuraciones, las cuales poseen ángulos de inclinación de 45°, 90° y 135°. Esto se realiza con la finalidad de analizar los efectos de estos cambios en el perfil de deposición para cada caso.

Para lograr esto, se realiza una simulación fluidodinámica de un gas en una tobera plana De Laval convergente-divergente, luego en el gas ya simulado se inyectan partículas de cobre granuladas. Se obtienen los resultados de estas partículas y son post procesados para obtener distintos resultados, entre los que destaca el perfil de deposición, que corresponde a la forma que poseen las partículas depositadas en el sustrato -superficie que recibe el impacto de las partículas-. Para la obtención de los perfiles de deposición se consideran las partículas de cobre esféricas.

La simulación se realiza mediante el *software* ANSYS versión 18.2. Los efectos viscosos en el flujo son incorporados mediante el modelo k- ϵ estándar y para añadir el efecto turbulento en el gas, se utiliza el modelo *Discrete Random Walk* (DRW). Además, la simulación se realiza en régimen transiente y el *solver* utilizado corresponde a *Density-Based*.

Los resultados señalan que la tobera con alimentador de 90° presenta un mejor desempeño en lo que respecta porcentaje de deposición -de partículas y masa- siendo éste casi el doble en comparación a las otras toberas -con alimentador de 45° y 135°- y su perfil de deposición posee una forma semejante a una campana de Gauss achatada. Por otro lado, la tobera con alimentador de 45° posee un perfil de deposición particular, en donde se obtiene una figura cóncava (especie de media luna).

Las diferencias entre los distintos alimentadores y sus respectivos perfiles de deposición radican en la dirección de la velocidad con que ingresan a la tobera -la cual es definida por el tipo de alimentador-. Siendo el caso en que las partículas no poseen velocidad horizontal en la entrada el que presenta mejor desempeño -tobera con alimentador de 90°-. Otro factor que afecta en las diferencias entre los distintos alimentadores y sus perfiles de deposición es la trayectoria que utilizan las partículas desde que son inyectadas, siendo las partículas que viajan por la zona de flujo que presenta una mayor velocidad -centro de la tobera- las que presentan mayor probabilidad de adherirse.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
1. Objetivos y Alcances	2
1.1. Objetivo General.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances.....	2
2. Antecedentes.....	4
2.1. Antecedentes generales.....	4
2.2. Motivación.....	5
2.3. Ventajas del proceso <i>Cold Spray</i>	6
2.4. Aplicaciones del proceso <i>Cold Spray</i>	7
2.5. Geometría de las toberas.....	8
2.6. Perfil de deposición	9
2.7. Velocidad crítica.....	10
2.8. Eficiencia de deposición.....	11
2.9. Distribución Rosin-Rammler.....	12
3. Modelos y Métodos Numéricos.....	14
3.1. Modelo para flujo compresible.....	14
3.2. Modelo numérico de resolución	19
3.3. Tratamiento de pared e Inicialización	21
3.4. Modelo de arrastre de partículas.....	24
3.5. Modelo de intercambio de calor de partículas.....	27
3.6. Modelo estocástico	28
4. Metodología.....	31
4.1. Definición de la investigación	33
4.2. Validación.....	34
4.3. Modelo definitivo	37
4.3.1. Geometría del volumen de control	38
4.3.2. Mallado del volumen de control.....	40
4.3.3. Configuraciones previas a la simulación (<i>Setup</i>)	42
4.3.4. Inyección de partículas	44
4.4. Polvo metálico	46
4.5. Análisis de sensibilidad	47
4.6. Ubicación horizontal del alimentador.....	48
4.7. Alimentadores.....	49

4.8. Perfiles de deposición.....	50
4.9. Flujo de partículas cerca del sustrato.....	51
4.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas	52
4.11. Altura de la deposición	54
5. Validación.....	56
6. Resultados y Discusiones	62
6.1. Geometría del volumen de control	62
6.2. Análisis de sensibilidad	63
6.3. Ubicación horizontal del alimentador.....	64
6.4. Alimentadores.....	67
6.5. Mallado volumen de control con alimentador.....	68
6.6. Contornos flujo de gas.....	69
6.6.1. Tobera con alimentador de 45°	69
6.6.2. Tobera con alimentador de 90°	71
6.6.3. Tobera con alimentador de 135°.....	73
6.7. Variación velocidad y temperatura de partículas durante trayecto.....	75
6.7.1. Velocidad horizontal.....	76
6.7.2. Temperatura.....	78
6.8. Perfiles de deposición.....	80
6.8.1. Perfiles de deposición sin criterio de adhesión.....	82
6.8.2. Perfiles de deposición con criterio de adhesión.....	86
6.8.3. Comparación perfiles de deposición según criterio adhesión	89
6.9. Flujo de partículas cerca del sustrato.....	92
6.9.1. Diámetro de partículas previo al impacto.....	92
6.9.2. Velocidad de partículas previo al impacto	94
6.9.3. Temperatura de partículas previo al impacto	95
6.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas	99
6.10.1. Perfiles de deposición sin criterio de adhesión.....	100
6.10.2. Perfiles de deposición con criterio de adhesión.....	100
6.11. Altura de la deposición	102
7. Conclusiones.....	103
8. Bibliografía.....	105
9. Anexos	107
9.1. Anexo A.....	107

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Valores de la constante σ para cada ecuación.	18
Tabla 4.1. Condiciones iniciales del flujo de gas (nitrógeno).	33
Tabla 4.2. Áreas transversales tobera comercial.	39
Tabla 4.3. Secciones de mallado del volumen de control definitivo, presentadas en orden decreciente con respecto a la fineza del mallado.	41
Tabla 4.4. Detalle del solver y modelos utilizados para las simulaciones.	42
Tabla 4.5. Condiciones termodinámicas iniciales del volumen de control.	43
Tabla 4.6. Discretización numérica en sección de métodos.	43
Tabla 4.7. Configuración inyección de partículas para pestaña Point Properties.	45
Tabla 4.8. Detalle de distribución de diámetros polvo metálico de cobre (Cu-159).	47
Tabla 5.1. Valores referentes a las secciones indicadas en Figura 5.1.	56
Tabla 5.2. Nombre y tamaño de elemento de cada sección del volumen de control ilustrado en Figura 5.2.	57
Tabla 6.1. Detalle de los valores indicados en Figura 6.1.	63
Tabla 6.2. Número de elementos y velocidad máxima del gas de cada mallado. También el error con respecto al mallado más fino.	63
Tabla 6.3. Porcentajes de deposición de partículas para cada diámetro de partículas y posición de inyección.	66
Tabla 6.4. Detalle del tamaño de elemento para cada sección de mallado.	68
Tabla 6.5. Valores mínimo, promedio, máximo y desviación estándar de temperatura y velocidad para el conjunto de 7.200 partículas en el impacto.	84
Tabla 6.6. Tiempo de permanencia mínimo, promedio, máximo y desviación estándar del conjunto de 7.200 partículas para cada alimentador.	84
Tabla 6.7. Porcentaje de deposición de partículas y masa para cada tobera.	91

Índice de Figuras

Figura 2.1. Diagrama general del proceso de cold spray [5].....	5
Figura 2.2. Cuerpo geométrico de una tobera.	8
Figura 2.3. Cuerpo geométrico de una tobera plana.....	9
Figura 2.4. Perfil de deposición esperado para la deposición de aluminio. (a) Perfil de deposición en 3D, (b) Perfil de deposición en 2D.	10
Figura 3.1. Diagrama del método de resolución Density-Based.....	20
Figura 4.1. Esquema de la metodología del presente trabajo de investigación.....	32
Figura 4.2. Ángulo de inclinación α entre tobera y alimentador. En rojo el alimentador y en azul la tobera.	32
Figura 4.3. Microtobera De Laval convergente-divergente comparada con una moneda de 10 céntimos de euro [21].	34
Figura 4.4. Distribución de diámetros de partículas de aluminio utilizadas en mediciones experimentales [21].	35
Figura 4.5. Trayectoria de partículas de aluminio (segmentos en rojo) que fueron iluminadas por una fuente externa, con un tiempo de exposición de 1 μ s. [22].....	36
Figura 4.6. Resultados obtenidos mediante simulación numérica por A. Sova. Temperatura de impacto (izquierda) y velocidad de impacto (derecha) para distintos diámetros.	37
Figura 4.7. Tobera plana comercial Karcher (Flat jet nozzle, XXL).....	38
Figura 4.8. Condiciones de borde del volumen de control. En verde y rojo la entrada del gas, en azul las paredes y en morado la salida del gas -zona free jet-.	39
Figura 4.9. Bosquejo definitivo del volumen de control (tobera más zona de free jet) con las condiciones de borde indicadas.	40
Figura 4.10. Bosquejo volumen de control final con las secciones de mallado.	41
Figura 4.11. Gráfico de distribución de diámetros polvo metálico de cobre (Cu-159). Datos de Tabla 4.8.	47
Figura 4.12. Alimentador de partículas externo, modelo AT-1200 Rotary Powder Feeder.....	49
Figura 4.13. Bosquejo tobera y sustrato, donde además se indica la región de análisis (en color rojo) con sus respectivas dimensiones.	52
Figura 4.14. Puntos de inyección en superficie mediante Type injection: surface	53
Figura 4.15. Región de impacto o zona de dispersión (segmento AB).	54
Figura 5.1. Geometría de la tobera convergente-divergente utilizada en simulación numérica. ..	56
Figura 5.2. Secciones del volumen de control y sus condiciones de borde.....	57
Figura 5.3. Perfiles de velocidad del gas. Resultados validación (arriba) y resultados A. Sova (abajo).....	58
Figura 5.4. Perfiles de temperatura del gas. Resultados validación (arriba) y resultados A. Sova (abajo).....	58
Figura 5.5. Trayectoria partículas de aluminio de 15 μ m de diámetro, donde el color representa la velocidad horizontal de la partícula.....	59
Figura 5.6. Comparación velocidad de impacto obtenidas mediante simulación numérica. En rojo resultados de la validación y en azul resultados obtenidos por A. Sova.	60
Figura 5.7. Comparación temperatura de impacto obtenidas mediante simulación numérica. En rojo resultados de la validación y en azul resultados obtenidos por A. Sova.	60

Figura 5.8. Distribución de velocidades para las partículas de diámetros entre 15 μm y 45 μm . .	61
Figura 6.1. Volumen de control definitivo con sus medidas correspondientes.	62
Figura 6.2. Curva de velocidad máxima del gas en función del número de elementos.	64
Figura 6.3. Diseño tobera sin alimentador y zona de free jet para configuración "injection type: group" con un total de 400 partículas. Las curvas verdes corresponden a la trayectoria de las partículas.	65
Figura 6.4. Velocidad máxima, mínima y promedio para cada diámetro de partícula y posición de inyección con su respectiva velocidad crítica promedio para el conjunto de partículas.	65
Figura 6.5. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 45°	67
Figura 6.6. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 90°	67
Figura 6.7. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 135° .	67
Figura 6.8. Secciones de mallado para volumen de control.	68
Figura 6.9. Contorno de velocidad absoluta del volumen de control para tobera con alimentador de 45°	69
Figura 6.10. Contorno de velocidad absoluta en zona de alimentador para tobera con alimentador de 45°	70
Figura 6.11. Contorno de temperatura del volumen de control para tobera con alimentador de 45°	70
Figura 6.12. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 45°	71
Figura 6.13. Contorno de velocidad absoluta del volumen de control para tobera con alimentador de 90°	71
Figura 6.14. Contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador para tobera con alimentador de 90°	72
Figura 6.15. Contorno de temperatura para tobera con alimentador de 90°	72
Figura 6.16. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 90°	73
Figura 6.17. Contorno de velocidad absoluta para tobera con alimentador de 135°	73
Figura 6.18. Contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador para tobera con alimentador de 135°	74
Figura 6.19. Contorno de temperatura para tobera con alimentador de 135°	74
Figura 6.20. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 135°	75
Figura 6.21. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 45°	76
Figura 6.22. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 90°	77
Figura 6.23. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 135°	77
Figura 6.24. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 45°	78
Figura 6.25. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 90°	78
Figura 6.26. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 135°	79

Figura 6.27. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 45°.....	80
Figura 6.28. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 90°.....	81
Figura 6.29. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 135°.....	81
Figura 6.30. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 45°.....	82
Figura 6.31. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 90°.....	82
Figura 6.32. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 135°.....	83
Figura 6.33. Comparación de los perfiles de deposición de cada alimentador para todas las partículas.....	83
Figura 6.34. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 45°.....	86
Figura 6.35. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 90°.....	87
Figura 6.36. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 135°.....	87
Figura 6.37. Comparación de los perfiles de deposición de cada alimentador para las partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica-.....	88
Figura 6.38. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 45°.....	89
Figura 6.39. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 90°.....	89
Figura 6.40. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 135°.....	90
Figura 6.41. Distribución de diámetro de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45°.....	92
Figura 6.42. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45°.....	93
Figura 6.43. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45°.....	93
Figura 6.44. Distribución de diámetro de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90°.....	94
Figura 6.45. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90°.....	94
Figura 6.46. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90°.....	95
Figura 6.47. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.....	95
Figura 6.48. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.....	96
Figura 6.49. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.....	96
Figura 6.50. Trayectoria de las partículas en función del diámetro en tobera con alimentador de 45° para t=0,0018 s.....	99
Figura 6.51. Comparación de las aproximaciones de los perfiles de deposición de cada alimentador para todas las partículas.....	100

Figura 6.52.Comparación de las aproximaciones de los perfiles de deposición de cada alimentador para las partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- 101

Figura 6.53. Alturas de deposición de cada tobera durante 2 segundos de deposición de partículas. 102

Introducción

El uso de procesos de manufactura aditiva en la industria e investigación actualmente se encuentra en constante desarrollo, específicamente el uso de metales como materia prima para la construcción o reparación de máquinas o equipos. Entre los procesos de manufactura existe uno llamado *Cold Spray*, que es sobre el cual se enfoca este trabajo de título, éste consiste en la deposición de partículas metálicas granuladas a alta velocidad sobre una superficie -sustrato- generando un recubrimiento. Esto se logra mediante un gas a alta presión -generalmente helio o nitrógeno- que arrastra las partículas inyectadas en el flujo, este gas viaja a través de una tobera De Laval convergente-divergente logrando que se acelere y alcance velocidades supersónicas.

En la actualidad *Cold Spray* es utilizado principalmente para reparar superficies dañadas por abrasión o mejorar la resistencia a la corrosión mediante la adición de partículas de aluminio en superficies de magnesio [1]. La fácil implementación y operación de este proceso, además del bajo costo y tiempo de operación, lo hace competitivamente viable en comparación a otros procesos de manufactura aditiva.

Dados los beneficios que presenta *Cold Spray*, es de gran interés lograr impresiones 3D de piezas metálicas mediante este proceso. Es por este motivo que en la presente investigación se analiza el efecto que produce en la deposición de las partículas la variación en el ángulo con que ingresan éstas a la tobera a través de un alimentador, en donde se utilizan tres distintos ángulos de alimentación, 45°, 90° y 135°. Específicamente, se analiza el perfil de deposición generado en el sustrato, que corresponde a la forma del conjunto de partículas depositadas en el sustrato.

El trabajo se lleva a cabo mediante simulaciones fluidodinámicas computacionales, en donde se simula nitrógeno bajo condiciones termodinámicas iniciales usualmente utilizadas en este proceso. Una vez simulado el gas, se inyectan partículas de cobre y se analizan las propiedades de éstas para cada posición durante su recorrido. De esta forma se conoce el comportamiento de las partículas para cada tipo de alimentación.

Por lo tanto, este trabajo se enfoca en observar los cambios en el comportamiento de las partículas desde que ingresan hasta que impactan el sustrato, en donde además se utiliza un parámetro para definir qué partículas se adhieren y cuáles no, éste corresponde a la velocidad crítica, que es obtenida de manera experimental, de esta forma las partículas que superen la velocidad crítica se considera que son adheridas en el sustrato. Esto último abre camino a definir un porcentaje de deposición, que es la proporción entre las partículas adheridas y todas las partículas eyectadas -asimismo se obtiene un porcentaje de deposición en función de la masa depositada versus la masa inyectada-.

1. Objetivos y Alcances

1.1. Objetivo General

Analizar el perfil de deposición mediante cambios en la alimentación de las partículas granuladas, específicamente, cambios en el ángulo de ingreso de las partículas a la tobera.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar geometría de tobera plana para simular en Cold Spray
- Evaluar distintas propuestas de alimentación en *Cold Spray*
- Analizar perfil de deposición de partículas para cada propuesta
- Relacionar propuesta de alimentación con perfil de deposición
- Relacionar comportamiento de partículas con perfiles de deposición

1.3. Alcances

Los alcances de la presente investigación son los siguientes:

- Mediante ANSYS modelar gas nitrógeno y el arrastre de partículas de cobre (Cu-159) en una tobera plana convergente-divergente.
- Se proponen 3 alimentadores distintos para la adición de partículas en el interior de la tobera. Éstos poseen ángulos de inclinación de 45°, 90° y 135°.
- Cada propuesta de alimentación y perfil de deposición relacionado con éstas posee un total de 7.200 partículas, las cuales son añadidas a la vez mediante la inyección de tipo superficie (*type injection: surface*), Además estas partículas poseen una distribución de diámetros Rosin-Rammler y son consideradas esféricas.
- Las partículas se inyectan en el gas previamente simulado, por lo que no se considera el efecto dinámico que generan las partículas en el gas.
- Este trabajo no considera el fenómeno de *bow shock*, ya que se considera despreciable, por lo que no es modelado en las simulaciones. El fenómeno *bow shock* corresponde a una zona de baja velocidad que se genera en el sustrato, en la posición donde el flujo de gas impacta con éste. Por lo que se genera un colchón de gas que desacelera partículas de diámetros inferiores a 5 μm [2]. Dado que la distribución de diámetro de las partículas utilizadas posee una baja cantidad de partículas de este diámetro, se desprecia este fenómeno.

- Los perfiles de deposición obtenidos en este trabajo no consideran la modificación del sustrato a medida que se añaden partículas, por lo que el sustrato se considera plano durante todo el proceso. Esto se traduce en que los parámetros obtenidos para cada partícula se calculan para la posición horizontal donde se ubica el sustrato.
- El intercambio de calor entre tobera y ambiente se considera despreciable, por lo que la tobera es modelada como adiabática.
- Se realiza una aproximación para un número mayor de partículas de manera tal que los perfiles de deposición simulen el proceso de *cold spray* durante un tiempo determinado.
- Este trabajo no incluye evaluación económica del gas y partículas utilizados.
- Este trabajo corresponde a un análisis fluidodinámico computacional que no incluye validación experimental de los resultados obtenidos.
- La deposición de partículas no considera la deformación plástica de las partículas en el impacto, por lo que para obtener los perfiles de deposición se utiliza como parámetro principal el volumen de las partículas.

2. Antecedentes

2.1. Antecedentes generales

Cold Spray es un proceso de manufactura aditiva, variación del proceso pionero llamado *Thermal Spray*, el cual consiste en acelerar partículas de metal a alta temperatura -parcial o completamente fundidas- y depositar estas partículas en un sustrato, donde la deposición depende principalmente de la temperatura que se encuentran las partículas de metal en el impacto. Por otro lado, *Cold Spray* produce el mismo efecto mediante el uso de la energía cinética de las partículas metálicas como parámetro principal, por lo que no es necesaria una alta temperatura de éstas para generar la unión en el sustrato, sino que energía cinética suficiente para poder ser transformada en energía de deformación plástica, produciéndose la adhesión de las partículas en el sustrato. Por lo tanto, el parámetro principal de este proceso es la velocidad de las partículas en el impacto con el sustrato.

Dado que el proceso analizado en esta investigación corresponde a *cold spray*, se detalla este proceso. Para acelerar las partículas granuladas de metal de diámetro del orden de 5-45 μm -que son el diámetro usual de éstas- se requiere de un gas a alta presión que ingresa por la sección convergente de la tobera, luego este gas es comprimido aún más debido a la geometría de la tobera hasta llegar a la sección donde el área transversal es mínima, la garganta, posterior a esta sección comienza la zona divergente donde ocurre todo lo contrario, el gas es expandido y, por lo tanto, acelerado alcanzando velocidades cercanas a los 1.000 m/s -velocidad supersónica- [3]. Este gas también puede ser calentado previo al ingreso a la tobera para mejorar la deposición de las partículas en el sustrato, ya que las partículas a mayor temperatura de impacto poseen mejor adhesión [4].

Con respecto a la tobera, se utiliza una tobera De Laval convergente-divergente, la cual consiste en un dispositivo usualmente utilizado para acelerar fluidos debido a la geometría de ésta. En secciones posteriores, en este mismo capítulo, se detallará de manera más precisa las partes de la tobera.

La inyección de partículas -a temperatura ambiente usualmente- en la tobera se realiza mediante un alimentador, éste corresponde a un extremo que sobresale de la tobera, el cual se conecta al depósito de partículas metálicas o a un alimentador externo en caso de requerirse una presión de inyección mayor a la atmosférica. La alimentación puede realizarse previo a la garganta o posterior a ésta, o incluso previo al ingreso a la tobera. Las partículas al ser arrastradas por el gas adquieren energía cinética y son aceleradas en el interior de la tobera para luego ser eyectadas por la misma, impactando al sustrato.

En la Figura 2.1 se puede apreciar un diagrama donde se indican los elementos principales y previamente señalados para el proceso de *cold spray*, en donde se inyectan las partículas previo al ingreso a la tobera y el gas es calentado.

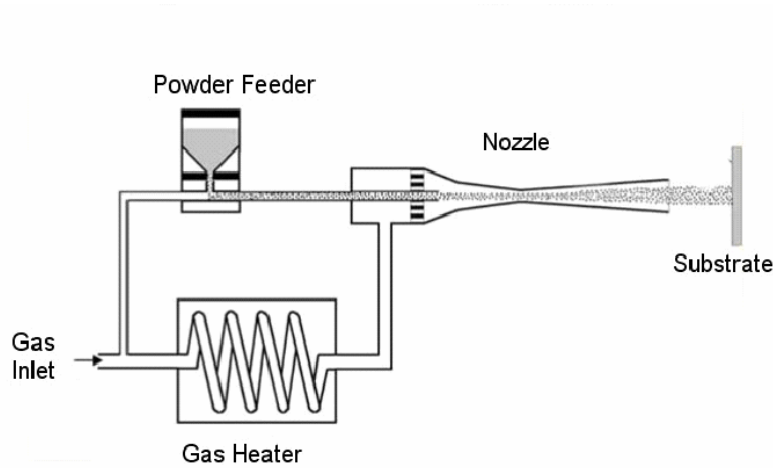


Figura 2.1. Diagrama general del proceso de *cold spray* [5].

Esta investigación se relaciona en algunos aspectos con la investigación previa realizada por el alumno -ahora ingeniero civil mecánico- Mario Parot, con su trabajo titulado “Modelamiento fluido-dinámico de microtoberas de *cold spray* para la deposición de partículas de cobre utilizando mezclas helio-nitógeno” [6]. En este trabajo se optimiza la geometría de una tobera para mezclas de gases, sin embargo, el procedimiento para realizar las simulaciones son muy similares.

2.2. Motivación

La motivación principal de la presente investigación corresponde a analizar los perfiles de deposición y ver cómo éstos se ven afectados ante cambios en la alimentación de las partículas granuladas. Conociendo los efectos en los cambios de alimentación se puede utilizar para controlar la deposición que se requiera en el sustrato, logrando perfiles específicos.

Lo anterior se relaciona de manera directa con la impresión en 3D de piezas metálicas mediante *cold spray*, lo cual actualmente no se ha logrado para piezas que posean geometrías complejas, sin embargo, se encuentra en desarrollo. Una de las organizaciones que se encuentra trabajando en el desarrollo e investigación de impresiones 3D mediante *cold spray* es la organización australiana CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* u Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth) que ha logrado avances con esta finalidad, en donde han automatizado el proceso de manera tal que exista sincronía entre el movimiento de la tobera y el sustrato mediante brazos robóticos que los sostienen para obtener deposición de partículas en distintos planos o superficies.

La impresión 3D mediante este proceso requiere de la menor dispersión posible de las partículas al salir de la tobera, ya que de esta manera se logra una definición más precisa en lo que respecta la deposición de las partículas. La solución inmediata a este problema es disminuir el tamaño de la tobera, sin embargo, a medida que se disminuye el tamaño de éstas aumenta el efecto viscoso de las paredes con el flujo, lo que reduce la velocidad del gas y, por lo tanto, de las partículas, lo que reduce la eficiencia de deposición.

El gas utilizado corresponde a helio y las partículas metálicas son de cobre, estos materiales poseen la característica de tener un bajo costo, por un lado el helio posee un precio inferior al helio, que es un gas con mejores propiedades para el proceso y que es usualmente utilizado, pero posee un costo significativo y por otro lado, el cobre es un material de fácil acceso a nivel nacional, lo cual hace que los resultados obtenidos sean más fácil y accesibles de replicar de manera experimental.

Por lo tanto, mediante esta investigación se obtendrán los efectos en el comportamiento de las partículas y, en consecuencia, en el perfil de deposición ante cambios en distintas formas de alimentación. Lo cual no ha sido investigado y abrirá paso a nuevas investigaciones relacionadas con modificaciones en la alimentación y posibles verificaciones experimentales de los resultados obtenidos.

2.3. Ventajas del proceso *Cold Spray*

Las ventajas que presenta el proceso de *cold spray* son la siguientes:

- El proceso de *cold spray* consume baja energía en comparación al proceso del cual derivó, *thermal spray*, ya que no requiere de partículas fundidas o parcialmente fundidas, por lo que la energía requerida radica principalmente en el controlador del gas que se inyecta en la tobera y del alimentador externo en caso de ser necesario, además de la energía necesaria para desplazar la tobera mientras ésta deposita material en el sustrato. Por otro lado, si es comparado con procesos de manufactura aditiva para metales que son altamente utilizados actualmente, consume menos energía, ya que éstos requieren de una fuente de energía externa de alto consumo como suele ser un láser (por ejemplo, LENS, LMD, SLS, DMLS, entre otros).
- Las propiedades mecánicas de la deposición son preferentemente favorables, ya que al no requerirse de altas temperaturas de las partículas, como lo es en el caso de *thermal spray*, éstas no sufren de cambios en su microestructura, sólo deformándose plásticamente en el impacto, lo cual genera endurecimiento por deformación plástica, aumentando la dureza y resistencia mecánica de la deposición. Por el contrario, en *thermal spray* la partícula se encuentra fundida o parcialmente fundida, por lo que ésta impacta en este estado y se cristaliza posterior a la deposición, lo que produce una menor dureza y resistencia mecánica.

- Un grave problema que presenta el proceso de *thermal spray* es que las partículas al encontrarse a alta temperatura son más propensas a oxidarse al entrar en contacto con oxígeno -teniendo en consideración que dado el funcionamiento del proceso, éste tiene contacto con el ambiente y, por lo tanto, con oxígeno- lo que produce que partículas no sean capaces de adherirse producto de la capa de óxido generado en las partículas. Esto último no ocurre con *cold spray*, ya que las partículas son inyectadas a temperatura ambiente -usualmente y, en caso de no hacerse a esta temperatura, ésta nunca es tan alta como en *thermal spray*- por lo que la oxidación de las partículas no es relevante en este proceso.
- Proceso fácil de operar, ya que sólo se debe ajustar la presión del gas, el intercambiador de calor del gas (en caso de ser calentado), alimentador externo (en caso de requerirlo) y configurar el movimiento de la tobera durante la deposición -movimiento transversal-, este movimiento es en línea recta y en caso de requerir un mayor espesor de material depositado, se realiza otro recorrido sobre la superficie de deposición. En relación a esta ventaja, permite que este proceso pueda ser empleado directamente en piezas que se encuentran ensambladas en una máquina o equipo, evitando el desmontaje de estas piezas para su posterior reparación. Además, debido a cómo opera este proceso, posee un tiempo de operación bajo si es comparado con otros procesos de manufactura aditiva, como por ejemplo, SLM, EBM y LMD.

2.4. Aplicaciones del proceso *Cold Spray*

Este proceso es utilizado principalmente para generar recubrimientos a superficies que requieran una mayor protección, ya sea de tipo mecánica, abrasiva o modificaciones en el diseño. Además, actualmente se han logrado generar piezas mediante este proceso, sin embargo, es una arista que se encuentra en desarrollo, ya que no es posible fabricar piezas con geometrías complejas.

Entre las aplicaciones que posee este proceso se pueden destacar la deposición con recubrimiento de cobre, el cual es utilizado cuando la alta conductividad eléctrica y térmica son críticas [7]. Además de evitar la oxidación, también se disminuye la grieta por nucleación (*crack nucleation*) lo cual mejora las propiedades mecánicas de la pieza o recubrimiento.

La industria aeroespacial es una de las grandes beneficiadas por este proceso, ya que *cold spray* es utilizado para depositar aluminio o aleaciones de aluminio en superficies de magnesio que requieran mejorar la corrosión o ser reparados, el magnesio es un material altamente utilizado en esta área. La deposición de aluminio en magnesio o aleaciones de magnesio mejora la protección a la corrosión en medios acuosos [8]. Por ejemplo, es utilizado para reparar las cajas de cambios de los helicópteros que suelen dañarse por corrosión, por lo que les da mayor vida útil. También se utiliza para realizar mantenimientos de los tubos hidráulicos de los aviones B-1B, los cuales se dañan producto de las vibraciones y acciones abrasivas sobre éstos [9].

La ventaja que presenta este proceso con respecto al tiempo de operación y la fácil implementación conllevan a que sea un proceso altamente competente en lo que respecta a la manufactura aditiva, es por este motivo que su estudio y desarrollo son muy importantes para el futuro de *cold spray*.

2.5. Geometría de las toberas

Las toberas De Laval poseen dos secciones elementales que corresponden a la sección convergente y divergente, entre éstas se encuentra la garganta. La sección convergente corresponde a la zona donde la tobera presenta una disminución de su área transversal a medida que el flujo de gas avanza por ésta y la sección divergente corresponde a la zona donde ocurre lo opuesto, es decir, el área transversal aumenta a medida que el flujo de gas avanza. Además, la sección entre la salida de la tobera y el sustrato es conocida como sección de “*free jet*”. La garganta, por tanto, es la sección donde el área transversal es mínima.

En la Figura 2.2 se presenta una tobera De Laval, en donde se indican las secciones de ésta.

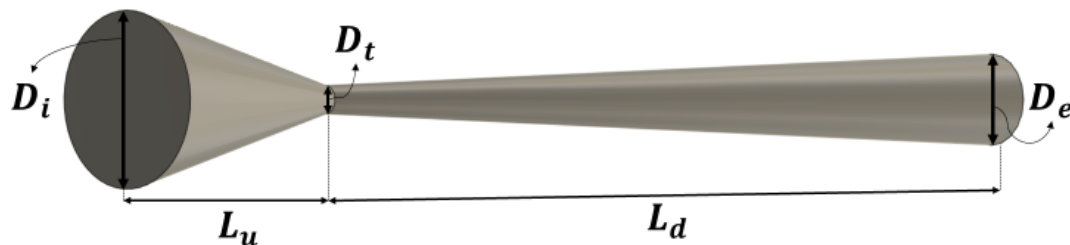


Figura 2.2. Cuerpo geométrico de una tobera.

En donde:

- D_i : Diámetro de entrada
- D_t : Diámetro de garganta
- D_e : Diámetro de salida
- L_u : Largo sección convergente
- L_d : Largo sección divergente

La tobera presentada en el diagrama corresponde a una tobera con geometría cónica, sin embargo, la tobera utilizada en esta investigación corresponde a una tobera plana. La diferencia entre ambas radica en la forma y, por consiguiente, en sus secciones transversales. La tobera plana posee una sección transversal con forma rectangular y la tobera con geometría cónica posee una sección transversal de forma circular. A pesar de esto, las secciones poseen los mismos nombres y en vez de utilizar diámetros como medida, éstos pasan a ser el largo del rectángulo que se genera en la sección transversal. Con respecto al ancho de este rectángulo, corresponde a la profundidad o espesor de la tobera plana.

Sobre lo último, en la Figura 2.3 se presenta el cuerpo de una tobera plana con las secciones de ésta.

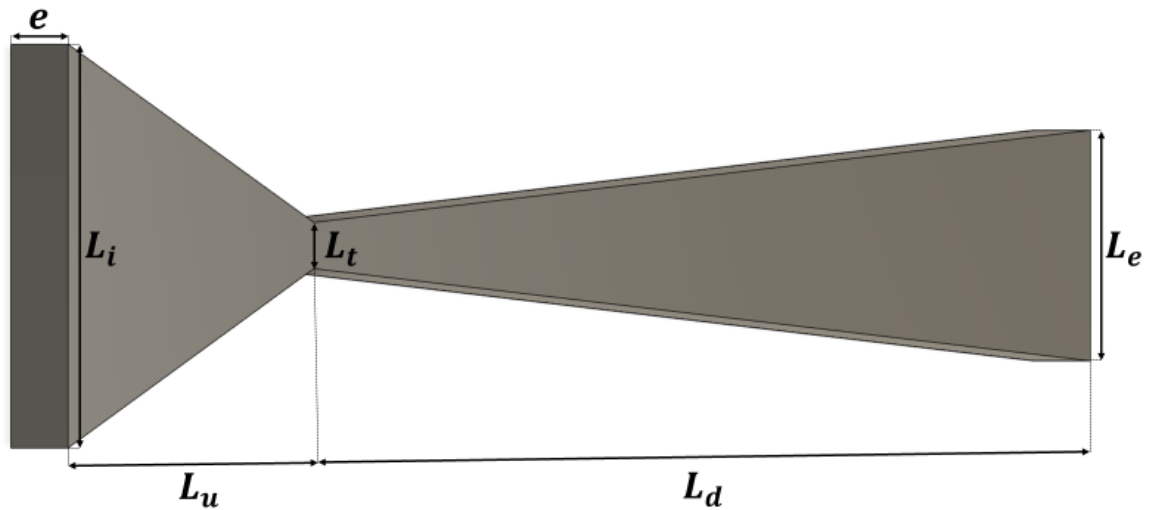


Figura 2.3. Cuerpo geométrico de una tobera plana.

En donde:

- L_i : Largo entrada
- L_t : Largo garganta
- L_e : Largo salida
- e : Profundidad o espesor
- L_u : Largo sección convergente
- L_d : Largo sección divergente

2.6. Perfil de deposición

El perfil de deposición corresponde a la geometría generada producto de la adhesión de partículas en el sustrato. Dicho de otra forma, es la silueta que se puede observar en el sustrato posterior a la deposición de partículas.

La forma esperada del perfil de deposición corresponde a una curva de Gauss o “campana de Gauss” (en dos y tres dimensiones) si el proceso es realizado desde un mismo punto, es decir, ni la tobera ni el sustrato se mueven durante la deposición.

En Figura 2.4 se observa el perfil de deposición esperado en la deposición de aluminio en un sustrato utilizando gas nitrógeno y el sustrato se encuentra a una distancia de 15 mm [10].

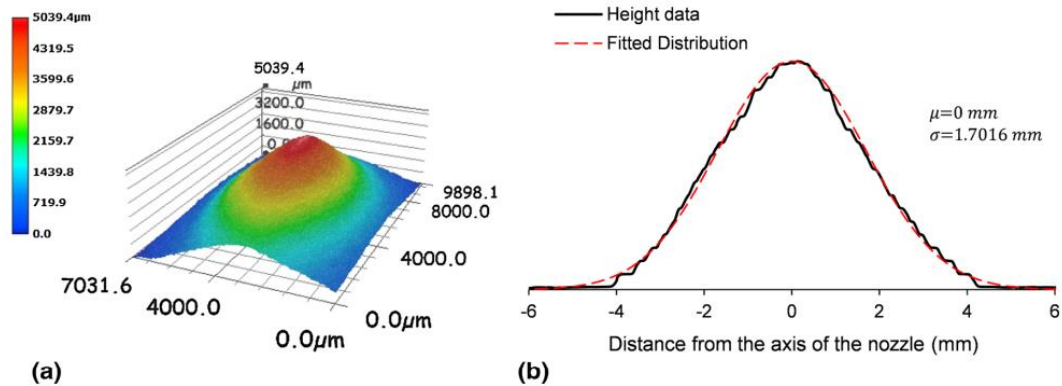


Figura 2.4. Perfil de deposición esperado para la deposición de aluminio. (a) Perfil de deposición en 3D, (b) Perfil de deposición en 2D.

Como se observa en estas figuras, la forma esperada por tanto, es una curva de Gauss para una deposición de partículas mediante el proceso de *Cold Spray* para una tobera cónica con diámetro de garganta de 2 mm, sección divergente de 120 mm y diámetro de salida de 6,6 mm. Con respecto a los valores termodinámicos utilizados para estos perfiles corresponden a temperatura del gas de 250 °C y presión del gas de 1,65 MPa.

Esta forma simétrica y concordante con una curva de Gauss se debe principalmente a que inyección utilizada para estos perfiles es realizada desde la superficie de ingreso de la tobera, lo cual corresponde al caso ideal e imposible de replicar, ya que en la práctica la inyección de partículas es realizada por una de las paredes de la tobera. Sin embargo, esta idealización del método de inyección ayuda a comprender de mejor manera la forma del perfil de deposición obtenido mediante una comparación con el perfil de deposición de la Figura 2.1.

Por lo tanto, el perfil de deposición es la consecuencia de las configuraciones iniciales, materiales utilizados durante el proceso de *Cold Spray* y aplicación del mismo.

2.7. Velocidad crítica

Durante el proceso de *cold spray* no todas las partículas se adhieren al sustrato, ya que sólo algunas adquieren la energía necesaria para deformarse en el impacto y quedar adheridas en el sustrato.

Es por este motivo que se debe tener un parámetro que discrimine entre partículas adheridas y partículas no adheridas. Este parámetro corresponde a la velocidad crítica, el cual define una velocidad límite que, en caso de que una partícula la supere, se considera que se adhiere al sustrato

y en caso de que la velocidad de impacto de la partícula sea inferior a la velocidad crítica, se considera que esta partícula no se adhiere al sustrato.

La ecuación que define la velocidad crítica para cada partícula se obtiene de manera experimental, ya que la mecánica de sólidos involucrada en el impacto y deformación de cada partícula requiere de un análisis más profundo. Sin embargo, utilizar una aproximación experimental que es obtenida mediante partículas de cobre -entre otros metales- se considera una buena aproximación para la finalidad de la presente investigación.

La velocidad crítica, por lo tanto, es independiente para cada partícula y depende del diámetro, temperatura de impacto y velocidad de impacto de cada una de éstas como se puede observar en la ecuación (2.1), que es la aproximación utilizada [11]. La velocidad y temperatura de impacto corresponden a la velocidad y temperatura que posee la partícula en el momento que impacta con el sustrato, es decir, en la posición donde se encuentra éste.

Definición 2.1: Velocidad crítica [9].

$$v_{cr} = 650 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \frac{0,42 \sqrt{\frac{d_p}{10[\mu m]} \cdot \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_m}\right)} + 1,19 \sqrt{1 - 0,73 \frac{T_{pi}}{T_m}}}{0,65 + \sqrt{\frac{d_p}{10[\mu m]}}} \quad (2.1)$$

- v_{cr} : Velocidad crítica [m/s]
- d_p : Diámetro de partícula [μ m]
- T_{pi} : Temperatura de impacto [K]
- T_m : Temperatura de fusión [K]

2.8. Eficiencia de deposición

Para obtener una relación entre las partículas adheridas y todas las partículas inyectadas durante el proceso de *cold spray*, se define la eficiencia de deposición. Ésta corresponde, precisamente, a la proporción entre partículas adheridas versus todas las partículas inyectadas, asimismo, relaciona la masa depositada en comparación a la masa total de todas las partículas inyectadas.

Por lo tanto, se definen dos tipos de eficiencia de deposición, por un lado, la eficiencia de deposición de partículas y por otro, la eficiencia de deposición de masa.

Definición 2.2: Eficiencia de deposición de partículas.

$$\eta_{partículas} = \frac{n_{part.adheridas}}{n_{part.total}} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

- $\eta_{partículas}$: Eficiencia de deposición de partículas [%]
- $n_{part.adheridas}$: Número de partículas adheridas [adimensional]
- $n_{part.total}$: Número total de partículas inyectadas [adimensional]

Definición 2.3: Eficiencia de deposición de masa.

$$\eta_{partículas} = \frac{m_{part.adheridas}}{m_{part.total}} \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

- $\eta_{partículas}$: Eficiencia de deposición de partículas [%]
- $m_{part.adheridas}$: Masa de partículas adheridas [adimensional]
- $m_{part.total}$: Masa total de partículas inyectadas [adimensional]

El cálculo de la eficiencia de deposición de masa es fácil de obtener experimentalmente, ya que se requiere de la masa depositada en el sustrato y de la masa total inyectada. Con respecto al cálculo de este parámetro de manera computacional mediante análisis fluidodinámico, se debe hacer uso de la velocidad crítica para discriminar entre partículas adheridas y no adheridas, además, en este contexto también se puede calcular la eficiencia de deposición de partículas, ya que mediante la simulación se cuenta con la información para cada partícula, no así en el caso experimental.

2.9. Distribución Rosin-Rammler

La modelación de una distribución de diámetros, cualquiera sea, se puede realizar mediante la distribución Rosin-Rammler, ésta se encarga de ajustar la curva de distribución de diámetros a una nueva curva que posee la información de la masa acumulada para un diámetro específico y los diámetros mayores a éste. Esta curva posee un conjunto de parámetros, los cuales son requeridos por el *software* ANSYS para describir la distribución de diámetros que se utilizará.

Primero, se deben definir intervalos discretos del total de diámetros que posee la distribución de diámetros, el número de estos intervalos es definido por el usuario, mientras mayor sea este número, mejor definición tendrá el ajuste a la distribución Rosin-Rammler.

Luego, cada uno de estos intervalos se debe relacionar con la fracción de masa que presentan dentro de los rangos establecidos por cada intervalo. De esta forma se posee la información de intervalos con sus respectivas proporciones másicas con respecto al total, cabe destacar que como se utiliza la fracción de masa, la suma de ésta para todos los intervalos debe ser igual a 1.

Después, se procede a definir la fracción de masa acumulada para un diámetro y los diámetros mayores a éste -el diámetro que se define suele ser el valor máximo de cada intervalo-. Así, se cuenta con la información de cuánta fracción de masa está presente en la distribución para cada diámetro, esta información corresponde a la nueva curva y ajuste Rosin-Rammler. Por lo tanto, la curva generada decae a medida que se aumenta de diámetro.

En consecuencia, se define la fracción de masa de las partículas de diámetro mayor a “ d ” como “ Y_d ”.

Definición 2.4: Curva de ajuste Rosin-Rammler.

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (2.4)$$

- Y_d : Fracción de masa acumulada para diámetros mayores a " d " [adimensional]
- d : Diámetro [m]
- \bar{d} : Constante de tamaño [m]
- n : Parámetro de tamaño de la distribución [adimensional]

Dado que se cuenta con la curva " Y_d " en función del diámetro " d ", se procede a obtener el valor de la constante de tamaño " \bar{d} ". Esto se realiza utilizando la ecuación (2.4), ya que si el diámetro es igual a la constante de tamaño ($d = \bar{d}$), implica que $Y_d = e^{-1} \approx 0,368$. Por lo tanto, observando la curva obtenida, se obtiene el valor del diámetro para el cual $Y_d = 0,368$. El diámetro obtenido, por tanto, corresponde a \bar{d} .

Despejando en la ecuación (2.4) el parámetro de tamaño de la distribución " n ", se obtiene la siguiente igualdad:

$$n = \frac{\ln(-\ln(Y_d))}{\ln(d/\bar{d})} \quad (2.5)$$

Con los parámetros obtenidos ya se tiene el ajuste Rosin-Rammler para añadir la distribución de diámetros de las partículas en el *software* ANSYS. El conjunto de parámetros solicitados consiste en la constante de tamaño " \bar{d} ", el parámetro de tamaño de la distribución " n ", el diámetro máximo y mínimo de la distribución.

3. Modelos y Métodos Numéricos

3.1. Modelo para flujo compresible

Asumiendo que el proceso es isentrópico y unidimensional -tobera ideal-, la ecuación que describe el comportamiento cinemático del gas en el interior de la tobera ideal es la siguiente:

Definición 3.1: Efecto del número de Mach en tobera ideal.

$$\frac{dV}{V} \cdot (M^2 - 1) = \frac{dA}{A} \quad (3.1)$$

- V : Velocidad media del gas [m/s]
- M : Número de Mach [adimensional]
- A : Área de la sección transversal de la tobera [m²]

A partir de esta ecuación se puede observar que en la garganta, debido que no existe variación en el área transversal, $dA = 0$, por lo que $M = 1$. Asimismo, teniendo en cuenta que lo que se busca con la tobera es aumentar la velocidad, es decir, $dV > 0$ y en la zona convergente $dA < 0$, por lo que para que la igualdad se cumpla, $M < 1$ (flujo subsónico), por otro lado, en la zona divergente $dA > 0$, lo que implica que $M > 1$ (flujo supersónico).

Esta ecuación se obtiene mediante la ecuación de conservación de masa y momentum, además de la ecuación de flujo isentrópico (todas estas ecuaciones en su forma diferencial).

Mediante la ecuación (3.1) es posible obtener parámetros termodinámicos del fluido en el interior de la tobera, específicamente, la temperatura, presión y densidad de éste.

Definición 3.2: Ecuaciones de temperatura, presión y densidad en la tobera.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2 \quad (3.2)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.3)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3.4)$$

- T : Temperatura actual del gas [K]
- T_0 : Temperatura inicial del gas [K]
- P : Presión actual del gas [MPa]
- P_0 : Presión inicial [MPa]
- ρ : Densidad actual del gas [kg/m^3]
- ρ_0 : Densidad inicial del gas [kg/m^3]
- M : Número de Mach del gas [adimensional]
- γ : Coeficiente de dilatación adiabática del gas [adimensional]

Hasta el momento, las ecuaciones presentadas no consideran el efecto turbulento del gas. Es por este motivo que para considerar este efecto, se modela la turbulencia mediante el modelo k-épsilon estándar. Existen más modelos de turbulencia, sin embargo, el modelo que se adecua al proceso de *cold spray* de mejor manera es éste, ya que el modelo k-épsilon estándar se enfoca en el comportamiento del flujo de gas en el centro de éste, sin darle prioridad al comportamiento del flujo de gas con la pared interior de la tobera -como sí lo hacen otros modelos, a costa de obtener resultados menos precisos en el centro del flujo de gas-.

Definición 3.3: Ecuaciones del modelo k-épsilon estándar (válidas en estado estacionario).

Continuidad

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.5)$$

Momentum

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.6)$$

Energía interna

$$\frac{\partial(\rho u_i c_p T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{C_p \cdot \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i \cdot (\tau_{ij})_{eff} \right] - P \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + S_c \quad (3.7)$$

Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.8)$$

Tasa de disipación de energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.9)$$

- ρ : Densidad del gas [kg/m³]
- u_i : Velocidad del gas en la coordenada i [m/s]
- x_i : Posición en la coordenada i [m]
- P : Presión del gas [Pa]
- μ : Viscosidad nominal del gas [Pa · s]
- μ_t : Viscosidad turbulenta del gas [Pa · s]
- δ_{ij} : Delta de Kronecker [adimensional]
- λ : Conductividad térmica del gas [W/(m · K)]
- C_p : Calor específico del gas [J/(kg · K)]
- Pr_t : Número de Prandtl turbulento [adimensional]
- T : Temperatura del gas [K]
- τ_{ij} : Tensor de esfuerzos [Pa]
- Sc : Número de Schmidt [adimensional]
- G_k : Generación de energía cinética turbulenta [Pa/s]
- G_b : Efecto de la gravedad en el flujo turbulento [Pa/s]
- Y_M : Efecto de la compresibilidad [Pa/s]
- $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$: Constantes del modelo [adimensional]
- S_k : Constante definida por el usuario [Pa/s]
- S_ε : Constante definida por el usuario [Pa/s²]
- k : Energía cinética por turbulencia [m²/s²]
- ε : Tasa de disipación de la energía turbulenta [m²/s³]

El valor del número de Prandtl turbulento toma valores entre 0,7 y 0,9, para efectos de la simulación se utiliza el valor 0,85 -valor por defecto en ANSYS-. Por otro lado, el término que considera el efecto de la gravedad en el flujo turbulento " G_b " se considera despreciable, ya que los efectos de la gravedad durante el proceso de *cold spray* son mínimos, esto se debe a que el tiempo que transcurre desde que las partículas son inyectadas hasta que impactan el sustrato son muy bajos -del orden de milésimas de segundo-, por lo que la variación que produce la gravedad en la velocidad vertical del flujo es ínfima, por consiguiente, $G_b = 0$.

Las constantes del modelo " $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ " para el modelo k-épsilon estándar toman los siguientes valores, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$. En relación a la constante $C_{3\varepsilon}$, su valor no es relevante debido a que en la ecuación donde ésta se encuentra (ecuación (3.9)) es multiplicada por el efecto de la gravedad en el flujo turbulento que, como ya se indicó, se considera igual a 0. Igualmente, las constantes definidas por el usuario " S_k " y " S_ε " se consideran nulas ($S_k = 0$ y $S_\varepsilon = 0$), ya que no existen fuentes externas que generen turbulencias.

El término $-\rho\overline{u'_i u'_j}$ de la ecuación (3.6) se conoce como los esfuerzos de Reynolds (*Reynolds stresses*) y puede ser calculado utilizando la hipótesis de Boussinesq [12].

Definición 3.4: Hipótesis de Boussinesq

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \cdot \delta_{ij} \quad (3.10)$$

- ρ : Densidad del gas [kg/m³]
- $\overline{u'_i}$: Valor medio de la componente fluctuante de la velocidad en i [m/s]
- $\overline{u'_j}$: Valor medio de la componente fluctuante de la velocidad en j [m/s]
- u_i : Velocidad del gas en la coordenada i [m/s]
- u_j : Velocidad del gas en la coordenada j [m/s]
- x_i : Posición en la coordenada i [m]
- x_j : Posición en la coordenada j [m]
- μ_t : Viscosidad turbulenta [Pa · s]
- k : Energía cinética por turbulencia [m²/s²]
- δ_{ij} : Delta de Kronecker [adimensional]

La componente fluctuante corresponde a un parámetro de la descomposición de Reynolds, que se utiliza para definir la velocidad en un intervalo de tiempo, específicamente, como la suma de la velocidad media y la velocidad fluctuante en este intervalo ($u_i = \overline{u_i} + u'_i$). Mediante esta descomposición se obtienen las ecuaciones previamente presentadas de continuidad (3.5) y momentum (3.6), que son conocidas como ecuaciones RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*).

Luego, con respecto al tensor de esfuerzos " τ_{ij} ", corresponde al esfuerzo generado entre dos capas de fluido producto de la viscosidad del mismo. El valor de éste se presenta en la siguiente igualdad:

Definición 3.5: Tensor de esfuerzos

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \mu_{eff} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \cdot \delta_{ij} \quad (3.11)$$

- τ_{ij} : Tensor de esfuerzos [Pa]
- u_i : Velocidad del gas en la coordenada i [m/s]
- u_j : Velocidad del gas en la coordenada j [m/s]
- x_i : Posición en la coordenada i [m]
- x_j : Posición en la coordenada j [m]
- μ_{eff} : Viscosidad efectiva del gas [Pa · s]

- δ_{ij} : Delta de Kronecker [adimensional]

La viscosidad efectiva del gas " μ_{eff} " corresponde a una combinación entre la viscosidad nominal y la viscosidad turbulenta. Donde esta última corresponde a:

Definición 3.6: Viscosidad turbulenta.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

- μ_t : Viscosidad turbulenta del gas [Pa · s]
- C_μ : Constante de viscosidad del modelo [adimensional]
- k : Energía cinética por turbulenta [m²/s²]
- ε : Tasa de disipación de la energía turbulenta [m²/s³]

Por lo tanto, la viscosidad efectiva queda definida por la siguiente ecuación:

Definición 3.7: Viscosidad efectiva.

$$\mu_{eff} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \quad (3.13)$$

- μ_{eff} : Viscosidad efectiva del gas [Pa · s]
- μ : Viscosidad nominal del gas [Pa · s]
- σ : Constante propia de cada ecuación [adimensional]

El valor de σ depende de la ecuación que se utilice, por tanto, en la Tabla 3.1 se presenta este valor en función de las ecuaciones disponibles.

Tabla 3.1. Valores de la constante σ para cada ecuación.

Ecuación	σ
Energía interna	1,0
Energía cinética turbulenta	1,0
Tasa de disipación de energía cinética turbulenta	1,3

Por otro lado, con respecto al valor de la constante de viscosidad del modelo " C_μ ", ésta toma el valor de 0,09 para el modelo k-épsilon estándar. Asimismo, el número de Schmidt " Sc " previamente presentado, equivale al cociente entre la difusión viscosa y la difusión de masa, éste

es el análogo al número de Prandtl en transferencia de calor, ANSYS por defecto utiliza $Sc = 0,7 [Pa/s]$.

Luego, el parámetro de generación de energía cinética turbulenta G_k , se obtiene mediante la siguiente igualdad:

Definición 3.8: Generación de energía cinética turbulenta.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.14)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.15)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.16)$$

- G_k : Generación de energía cinética turbulenta [Pa/s]
- S_{ij} : Tensor de la tasa de deformación [1/s]

Por último, en relación al término " Y_M ", efecto de la compresibilidad o también conocido como variación de la velocidad del sonido, se calcula de la siguiente forma:

Definición 3.9: Efecto de la compresibilidad.

$$Y_M = \frac{2\rho\varepsilon k}{\gamma RT} \quad (3.17)$$

- γ : Constante de expansión adiabática del gas [adimensional]
- R : Constante de gas ideal del gas [J/(K · mol)]
- T : Temperatura del gas [K]
- ρ : Densidad del gas [kg/m³]
- k : Energía cinética por turbulencia [m²/s²]
- ε : Tasa de disipación de la energía turbulenta [m²/s³]

3.2. Modelo numérico de resolución

Para resolver las ecuaciones gobernantes de continuidad, momentum y energía se requiere de un solucionador o modelo numérico de resolución. El utilizado en este trabajo corresponde al *Density-Based Solver*, éste resuelve las ecuaciones indicadas mediante un conjunto de ecuaciones o vector de ecuaciones. Además, este método es utilizado para flujos que poseen alta velocidad y que sean compresibles, para flujos que posean bajas velocidades y sean no compresibles, se utiliza el método *Pressure-Based Solver*.

Este modelo numérico - *Density-Based Solver*- dispone de dos algoritmos de resolución, por un lado, la formulación acoplada-explicita y por otro, la formulación acoplada-implícita (*coupled-explicit formulation* y *coupled-implicit formulation*, respectivamente). Las ecuaciones que gobiernan el sistema son no lineales, es en este contexto, que se requiere de estos algoritmos, ya que se encargan de linealizar las ecuaciones.

La formulación acoplada-implícita hace referencia a que, para una variable dada, el valor incógnito de cada celda es calculada usando la relación que incluye ambos valores -el valor conocido y valor incógnito- a partir de las celdas vecinas. Por lo tanto, cada valor incógnito aparecerá en más de una ecuación en el sistema y estas ecuaciones deben ser resueltas simultáneamente para obtener los valores incógnitos [13]. Esta formulación es la utilizada en la presente investigación.

Por otro lado, con respecto a la formulación acoplada-explicita, para una variable dada, el valor incógnito de cada celda es calculado usando una relación que incluye sólo los valores conocidos. Por consiguiente, cada incógnita aparecerá en sólo una ecuación en el sistema y las ecuaciones para el valor incógnito en cada celda puede ser resuelto uno a la vez para obtener estos valores [13].

En la Figura 3.1, se presenta un diagrama que simplifica la metodología que utiliza el método *Density-Based Solver*.

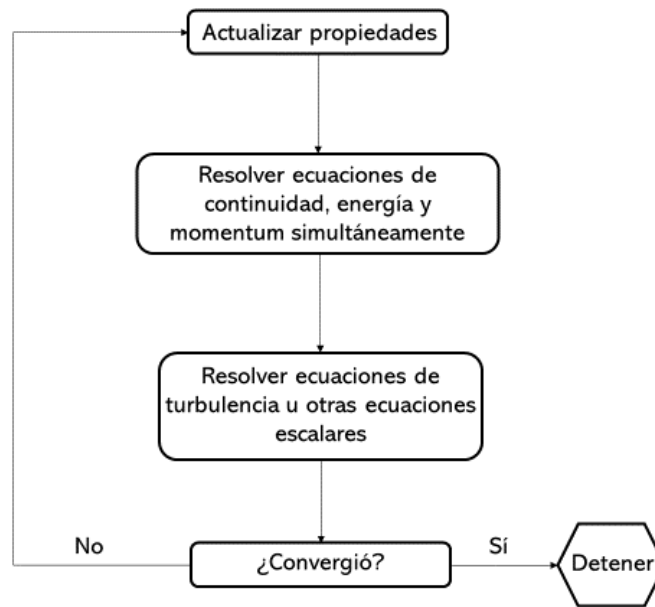


Figura 3.1. Diagrama del método de resolución *Density-Based*.

Como se puede apreciar en este diagrama, el método comienza actualizando las propiedades, en caso de ser la primera iteración, se comienza con los datos de la inicialización, luego se resuelven las ecuaciones de continuidad, energía y momentum -de manera simultánea-. Posterior a esto, se procede a resolver ecuaciones de turbulencias, que en este caso corresponden a las ecuaciones que entrega el método k-épsilon estándar, con las variables " k " y " ϵ ". A continuación, se verifica si la solución ha convergido, en caso de que no, se reanudan todos los pasos anteriores, y en caso de que sí, se detiene la iteración.

3.3. Tratamiento de pared e Inicialización

Con respecto al tratamiento de pared, se utilizan las funciones de pared estándar (*Standard Wall Functions*). Éstas definen el comportamiento del flujo en la pared dependiendo de los parámetros físicos de éste.

Primero, se definen dos parámetros adimensionales, que son la distancia a la pared y la velocidad, ambos para un punto P, que corresponde al centroide de la celda.

Definición 3.10: Distancia adimensional a la pared.

$$y^* = \frac{\rho_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (3.18)$$

- y^* : Distancia a la pared [adimensional]
- ρ_P : Densidad del gas en el punto P [kg/m³]
- C_μ : Constante del modelo estándar k-épsilon estándar ($C_\mu = 0.09$) [adimensional]
- k_P : Energía cinética turbulenta en el punto P [m²/s²]
- y_P : Distancia desde el punto P a la pared [m]
- μ : Viscosidad dinámica del gas [Pa · s]

Definición 3.11: Velocidad adimensional o ecuaciones de la ley de pared logarítmica.

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln (E \cdot y^*) \quad (3.19)$$

$$U^* \equiv \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\tau_w / \rho} \quad (3.20)$$

- U^* : Velocidad en el punto P [adimensional]
- κ : Constante de von Kármán ($\kappa = 0,4187$) [adimensional]
- E : Constante del tratamiento de pared ($E = 9,793$) [adimensional]
- U_P : Velocidad media del gas en el punto P [m/s]
- C_μ : Constante del modelo k-épsilon estándar ($C_\mu = 0,09$) [adimensional]
- k_P : Energía cinética turbulenta en el punto P [m²/s²]
- τ_w : Esfuerzo de corte [Pa]
- ρ : Densidad del gas [kg/m³]

El rango de valores de la distancia adimensional a la pared " y^* " depende del número de Reynolds del flujo. El valor límite inferior es aproximadamente 15 ($y^* \sim 15$), bajo este valor las funciones de pared pierden precisión y los resultados no se consideran aceptables. El valor límite superior depende fuertemente del número de Reynolds, tomando valores del orden de varios miles para números de Reynolds muy altos (aviones, por ejemplo) y del orden de los cientos para números de Reynolds bajos (por ejemplo, álabes de turbinas).

Sin embargo, cuando el mallado es tal que $y^* < 11,225$ en la celda adyacente a la pared, ANSYS aplica la relación de esfuerzo de corte laminar, que se presenta a continuación:

Definición 3.12: Esfuerzo de corte laminar.

$$\tau_{w\text{laminar}} \equiv \mu \frac{u_P}{y_P} \quad (3.21)$$

- $\tau_{w\text{laminar}}$: Esfuerzo de corte laminar [Pa]
- y_P : Distancia desde el punto P a la pared [m]
- μ : Viscosidad dinámica del gas [Pa · s]
- u_P : Velocidad instantánea del gas [m/s]

Por lo tanto, reemplazando (3.21) en (3.20), y considerando que en un flujo laminar la velocidad media es igual a la instantánea, es decir, $U_P = u_P$, se llega a que $y^* = U^*$. Además, con las ecuaciones presentadas ya se puede definir la velocidad en puntos adyacentes a la pared y, de esta forma, definir las condiciones de borde en la ecuación de momentum.

Con respecto a la temperatura en la pared -que se relaciona con la ecuación de energía- se debe tener en consideración que la pared de la tobera se asume adiabática, por lo que se requiere de una ecuación que no considere intercambio de calor con el exterior, es decir, la temperatura de un punto adyacente a una pared adiabática. En relación a esta temperatura, se puede considerar que la temperatura del flujo -o celda adyacente a la pared- es igual a la temperatura de la pared para un flujo de baja velocidad, sin embargo, para un flujo de alta velocidad ($Ma > 3$), la temperatura en la celda adyacente a la pared se calcula de la siguiente forma [13]:

Definición 3.13: Temperatura celda adyacente a pared adiabática.

$$T_P = T_w - \frac{Pr_t U^2}{2 \cdot C_p} \quad (3.22)$$

- T_P : Temperatura del gas en el punto P [K]
- T_w : Temperatura de la pared [K]
- Pr_t : Número de Prandtl turbulento [adimensional]

- U : Velocidad del gas en el punto P [m/s]
- C_p : Calor específico del gas [J/(kg · K)]

La temperatura de la pared adiabática se puede obtener conociendo el régimen del flujo, para más información consultar [15], donde se presenta el método para obtener la temperatura en la pared adiabática, además de una comparación de estos resultados teóricos con resultados experimentales.

Falta definir las condiciones de borde para las nuevas variables que entrega el modelo k-épsilon estándar (k y ε) y sus respectivas ecuaciones. Asimismo, se requiere de la condición de borde de la generación de energía cinética turbulenta " G_k ".

Definición 3.14: Condición de borde para energía cinética por turbulencia.

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3.23)$$

- k : Energía cinética turbulenta [m²/s²]
- n : Coordenada normal a la pared [m]

Definición 3.15: Generación de energía cinética turbulenta.

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (3.24)$$

- τ_w : Esfuerzo de corte [Pa]
- U : Velocidad media del gas [m/s]
- y : Posición normal a la pared [m]
- κ : Constante de von Kármán [adimensional]
- ρ : Densidad del gas [kg/m³]
- C_μ : Constante de viscosidad del modelo k-épsilon [adimensional]
- k_P : Energía cinética por turbulencia en el punto P [m²/s²]
- y_P : Distancia de la pared al punto P [m]

Por último, queda definir " ε_P " en función de " κ_P " (es decir, la tasa de disipación de la energía turbulenta en función de la energía cinética por turbulencia). El subíndice " P " hace referencia al valor de estos parámetros en el punto " P ", que como se señaló, es el centroide de la celda y para las condiciones de borde se utiliza la celda adyacente a la pared.

Definición 3.16: Condición de borde " ε_P " en términos de " κ_P ".

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa \gamma_P} \quad (3.25)$$

- ε_P : Tasa de disipación en el punto P [m^2/s^3]
- C_μ : Constante del modelo k - ε [adimensional]
- k_P : Energía cinética por turbulencia en P [m^2/s^2]
- κ : Constante de von Kármán [adimensional]
- γ_P : Distancia de la pared al punto P [m]

Con esto ya se cuenta con lo necesario para obtener todas las condiciones de borde de la pared del volumen de control. Con respecto a las secciones que no son pared, es decir, las entradas y salidas de flujo, son definidas por el usuario -condiciones iniciales-.

Luego, en relación a la inicialización, se realiza mediante la inicialización híbrida (*Hybrid Initialization*), ésta resuelve la ecuación de Laplace a partir de las condiciones de borde [16].

Finalmente, con las ecuaciones y modelos presentados es posible simular el gas. En las secciones siguientes se presentarán las ecuaciones que gobiernan la interacción entre el gas y partículas inyectadas.

3.4. Modelo de arrastre de partículas

El modelo del arrastre de partículas se trabaja de manera desacoplada, es decir, las partículas se añaden al gas simulado mediante las ecuaciones gobernantes de la sección anterior. Por lo tanto, no se consideran los efectos dinámicos y termodinámicos que producen las partículas en el gas, ya que el tamaño de las partículas es del orden de los micrones se considera este efecto despreciable.

En esta sección se presentan las ecuaciones que describen la cinemática, dinámica y termodinámica de las partículas, permitiendo obtener de esta forma la posición, velocidad y temperatura de cada partícula durante su trayectoria.

El modelo que se define para el arrastre de partículas es la Aproximación de Henderson [17] que es conocida también como *High-Mach-Number Drag Law*. Ésta es un ajuste al modelo de

arrastre *Spherical Law* [18] con corrección para tomar en cuenta partículas con un número de Mach superior a 0,4 y número de Reynolds superior a 20.

Definición 3.17: Fuerzas gobernantes sobre la partícula.

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D \cdot (u - u_p) + g_x \cdot \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.26)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \cdot \frac{C_D Re_p}{24} \quad (3.27)$$

$$Re_p = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3.28)$$

- u_p : Velocidad de la partícula [m/s]
- t : Tiempo [s]
- F_D : Fuerza de arrastre [N]
- u : Velocidad del gas [m/s]
- g_x : Aceleración de gravedad en la dirección x [m/s²]
- ρ_p : Densidad de la partícula [kg/m³]
- ρ : Densidad del gas [kg/m³]
- F_x : Fuerzas adicionales [N]
- μ : Viscosidad dinámica del gas [Pa · s]
- D_p : Diámetro de la partícula [m]
- C_D : Coeficiente de arrastre [adimensional]
- Re_p : Número de Reynolds de la partícula [adimensional]

Dado que la aceleración de gravedad se desprecia, como se señaló anteriormente, $g_x = 0$ en la ecuación (3.26). Asimismo, no existen fuerzas adicionales en el sistema, por lo que $F_x = 0$ en esta misma ecuación. Por otro lado, se puede observar en la ecuación (3.27) el término diámetro de la partícula " D_p ", ya que esta ecuación es sólo es válida para partículas esféricas.

La diferencia entre los modelos de arrastre radica principalmente en el coeficiente de arrastre utilizado. Con respecto al coeficiente de arrastre para el modelo Aproximación de Henderson se define para distintos regímenes, subsónico, transónico y supersónico.

Definición 3.18: Coeficientes de arrastre.

Régimen subsónico ($M_\infty \leq 1$)

$$C_D = 24 \left[Re_p + M_p \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \left\{ 4,33 + \left(\frac{3,65 - 1,53 \frac{T_w}{T}}{1 + 0,353 \frac{T_w}{T}} \right) \cdot \exp \left(-0,247 \frac{Re_p}{M_p} \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \right) \right\}^{-1} + \exp \left(-\frac{0,5 M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) \left[\frac{4,5 + 0,38(0,03 Re_p + 0,48 \sqrt{Re_p})}{1 + 0,03 Re_p + 0,48 \sqrt{Re_p}} + 0,1 M_p^2 + 0,2 M_p^8 \right] + 0,6 M_p \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \left[1 - \exp \left(-\frac{M_p}{Re_p} \right) \right] \right] \quad (3.29)$$

Régimen transónico ($1,00 < M_\infty < 1,75$)

$$C_D(M_\infty, Re_\infty) = C_D(1, Re_p) + \frac{4}{3} (M_\infty - 1) [C_D(1,75, Re_\infty) - C_D(1, Re_p)] \quad (3.30)$$

Régimen supersónico ($M_\infty \geq 1,75$)

$$C_D = \frac{0,9 + \frac{0,34}{M_\infty^2} + \left(\frac{M_\infty}{Re_\infty} \right)^{1/2} \left[2 + \frac{2}{M_\infty^2} \cdot \frac{2}{\gamma} + \frac{1,058}{M_\infty} \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \left(\frac{T_w}{T} \right)^{1/2} - \frac{1}{M_\infty^4} \cdot \left(\frac{2}{\gamma} \right)^2 \right]}{1 + 1,86 \left(\frac{M_\infty}{Re_\infty} \right)^{1/2}} \quad (3.31)$$

- C_D : Coeficiente de arrastre [adimensional]
- M_∞ : Número de Mach del gas [adimensional]
- Re_∞ : Número de Reynolds del gas [adimensional]
- M_p : Número de Mach relativo [adimensional]
- Re_p : Número de Reynolds de la partícula [adimensional]
- γ : Coeficiente de expansión adiabática [adimensional]
- T_w : Temperatura de partícula [K]
- T : Temperatura del gas en flujo libre [K]

La ecuación para el régimen transónico se obtiene mediante una interpolación lineal entre el régimen subsónico y supersónico. Es por este motivo que se utiliza la notación $C_D(1, Re_p)$, por ejemplo, que hace referencia al valor del coeficiente de arrastre para $M_\infty = 1$, $C_D(1,75, Re_\infty)$ al coeficiente de arrastre para $M_\infty = 1,75$ y $C_D(M_\infty, Re_\infty)$ al coeficiente de arrastre para $1,00 < M_\infty < 1,75$, es decir, para un número de Mach del gas que se encuentre en este rango.

El número de Mach relativo " M_p " corresponde al número de Mach obtenido a partir de la velocidad relativa de la partícula con respecto a la velocidad del fluido.

Por último, con las ecuaciones presentadas ya se puede modelar el arrastre de las partículas utilizando la Aproximación de Henderson, mediante la cual es posible obtener los parámetros cinemáticos de las partículas.

3.5. Modelo de intercambio de calor de partículas

En esta sección se presenta el modelo que gobierna el intercambio de calor entre el fluido y las partículas. La primera ecuación corresponde a un equilibrio de calor de la partícula con el fluido mediante los métodos de transferencia de calor de convección y radiación, en donde se considera que la temperatura de la partícula es uniforme durante su trayecto. Sin embargo, dado que el método de intercambio de calor entre partícula y fluido radica principalmente en convección, se desprecia la radiación, ya que dada la configuración del proceso, la radiación no tiene relevancia.

Por lo tanto, las ecuaciones que describen el intercambio de calor entre partícula y flujo son las siguientes:

Definición 3.19: Ecuaciones intercambio de calor entre energía y flujo

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.32)$$

$$T_p(t + \Delta t) = T_\infty + [T_p(t) - T_\infty] \cdot e^{\frac{-A_p h}{m_p c_p} \Delta t} \quad (3.33)$$

$$Nu = \frac{h D_p}{\lambda_\infty} = 2,0 + 0,6 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.34)$$

- m_p : Masa de la partícula [kg]
- c_p : Calor específico de la partícula [J/(kg K)]
- T_p : Temperatura de la partícula [K]
- T_∞ : Temperatura del fluido [K]
- t : Tiempo [s]
- Δt : Intervalo de tiempo de integración [s]
- h : Coeficiente de convección [W/(m²K)]
- A_p : Superficie de la partícula [m²]
- ε_p : Emisividad de la partícula [adimensional]

- σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$) [W/(m²K⁴)]
- θ_R : Temperatura de radiación [K]
- Nu: Número de Nusselt [adimensional]
- D_p : Diámetro de la partícula [m]
- λ_∞ : Conductividad térmica del gas [W/(m · K)]
- Re_p : Número de Reynolds de la partícula [adimensional]
- Pr: Número de Prandtl [adimensional]

Dado que la radiación no es considerada ($\varepsilon_p = 0$), el último término de la ecuación (3.32) se anula. Luego, si se resuelve esta ecuación diferencial para tiempos discretos y asumiendo que la variación de temperatura de la partícula es paulatina desde un instante de tiempo al siguiente, se obtiene la ecuación (3.33), esta ecuación entrega la temperatura de la partícula para un instante de tiempo " $t + \Delta t$ ", a partir de la temperatura que poseía en el instante " t ", es decir, es una ecuación recursiva.

Con respecto al coeficiente de convección " h ", es obtenido mediante la correlación de Ranz y Marshall [19] [20].

Por lo tanto, mediante las ecuaciones presentadas es posible obtener la temperatura de la partícula para cada instante de tiempo.

3.6. Modelo estocástico

El proceso de *cold spray*, y casi todos los procesos que posean flujos a alta velocidad, son procesos turbulentos, es decir, existe un comportamiento caótico del flujo y no determinista, esto no permite describir de manera determinística el comportamiento de las partículas en el fluido -en este caso, en el gas-. Por consiguiente, se debe añadir aleatoriedad a las partículas producto del arrastre generado por el gas para simular de mejor manera la realidad y la turbulencia que presente el gas.

El modelo utilizado para añadir este efecto en las partículas inyectadas a la tobera corresponde al modelo *Discrete Random Walk* (DRW) o también conocido con el nombre *Eddy Lifetime*. Este modelo asume que la aleatoriedad de las fluctuaciones de las velocidades obedece una distribución Gaussiana o normal -recordar la descomposición de Reynolds ($u_i = \bar{u}_i + u_i'$) descrita en la sección 3.1. **Modelo para flujo compresible-**.

Por lo tanto, esta velocidad fluctuante, que incorpora la turbulencia en la velocidad de la partícula, se define mediante la siguiente igualdad:

Definición 3.20: Velocidad fluctuante para modelo *Discrete Random Walk*.

$$u' = \xi \sqrt{u'^2} \quad (3.35)$$

- u' : Velocidad fluctuante instantánea [m/s]
- ξ : Valor aleatorio distribuido normalmente [adimensional]
- $\sqrt{u'^2}$: Root Mean Square (RMS) o valor eficaz [m/s]

Como se observa en esta ecuación, se añade la aleatoriedad mediante una distribución Gaussiana con el parámetro " ξ ", el cual se obtiene mediante este tipo de distribución de forma aleatoria. Asimismo, se utiliza el valor eficaz de la velocidad fluctuante -asumiendo isotropía para estas velocidades- y dado que se conoce la energía cinética de turbulencia en cada punto, se relaciona la velocidad fluctuante con el parámetro del modelo k-épsilon de la energía cinética turbulenta " k " de la siguiente manera:

Definición 3.21: RMS de velocidad fluctuante en función de la energía cinética de turbulencia " k ".

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (3.36)$$

- k : Energía cinética por turbulencia [m²/s²]

El valor " ξ " utilizado para obtener la velocidad fluctuante actúa durante un tiempo determinado, este tiempo es conocido como el tiempo de Eddy (*Eddy lifetime*) " τ_e ". Este tiempo puede ser definido de dos formas, por un lado como valor constante y por otro, como un valor aleatorio. Cabe destacar que para el presente trabajo ambas opciones entregan resultados similares y la carga computacional es semejante.

Definición 3.22: Tiempo de Eddy (*Eddy lifetime*).

Constante

$$\tau_e = 2T_L \quad (3.37)$$

Aleatorio

$$\tau_e = -T_L \ln(r) \quad (3.38)$$

- τ_e : *Tiempo de Eddy* [s]
- T_L : *Tiempo integral Lagrangiano del fluido* [s]
- r : *Variable aleatoria ($0 < r < 1$)* [adimensional]

Para obtener el tiempo integral Lagrangiano del fluido " T_L " se utiliza la siguiente aproximación para el modelo k-épsilon:

Definición 3.23: Tiempo integral Lagrangiano del fluido.

$$T_L \approx 0,15 \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.39)$$

- k : *Energía cinética por turbulencia* [m^2/s^2]
- ε : *Tasa de disipación de la energía turbulenta* [m^2/s^3]

Además de las ecuaciones previamente presentadas para el modelo estocástico, también se deben definir por el usuario el número de intentos (*Number of tries*) para cada partícula. De esta forma se obtienen resultados sobre la misma partícula bajo las mismas condiciones en el flujo turbulento, donde producto de éste, se obtendrán distintos resultados referentes a la velocidad, posición y temperatura de las partículas -como es esperable en la realidad-. Esto se debe principalmente debido a que se calcula la velocidad instantánea del gas mediante la descomposición de Reynolds, que incorpora la velocidad fluctuante, por lo que poseerá distintas velocidades instantáneas para cada tiempo, lo que genera distinto arrastre en las partículas y, por tanto, varía la aceleración y coeficiente de convección para cada una de éstas, provocando diferencias en las posiciones, velocidades y temperaturas, como se señaló.

Finalmente, mediante el modelo presentado es posible simular el efecto turbulento generado en las partículas producto del flujo de gas.

4. Metodología

Con el fin de lograr los objetivos propuestos para este trabajo de investigación, se realizaron una serie de acciones, éstas se detallan en el presente capítulo.

Primero se validó el modelo definitivo a utilizar mediante la validación de una investigación ya realizada, luego se determinó la geometría de la tobera a utilizar. Se realizaron las geometrías de los volúmenes de control y se definió el número de elementos de los mallados que se utilizaron mediante un análisis de sensibilidad. Utilizando los resultados entregados por uno de los volúmenes de control para el análisis de sensibilidad, se determina la posición del alimentador.

Una vez que se contó con todo lo anterior, se diseñaron los volúmenes de control de las toberas con alimentador y se procedió a simular los volúmenes de control mediante el modelo definitivo a utilizar, estos volúmenes se encuentran debidamente mallados con el número de elementos definido en la sección de análisis de sensibilidad.

Posterior a la simulación e inyección de partículas en el gas, se procesaron los datos y se obtuvieron los perfiles de deposición para cada tobera, además de gráficos de las partículas cercanas al sustrato previo al impacto en función del diámetro, velocidad y temperatura de éstas.

Finalmente, se realizó una aproximación de los perfiles de deposición para un número mucho superior de partículas, lo cual mejora la calidad del perfil de deposición en sí y simula la deposición de partículas mediante *cold spray* bajo parámetros usualmente utilizados. Asimismo, se obtuvieron las alturas de estos perfiles de deposición para cada caso.

En el esquema que se presenta en la Figura 4.1 se puede observar de manera simplificada los pasos seguidos para la obtención de los resultados.

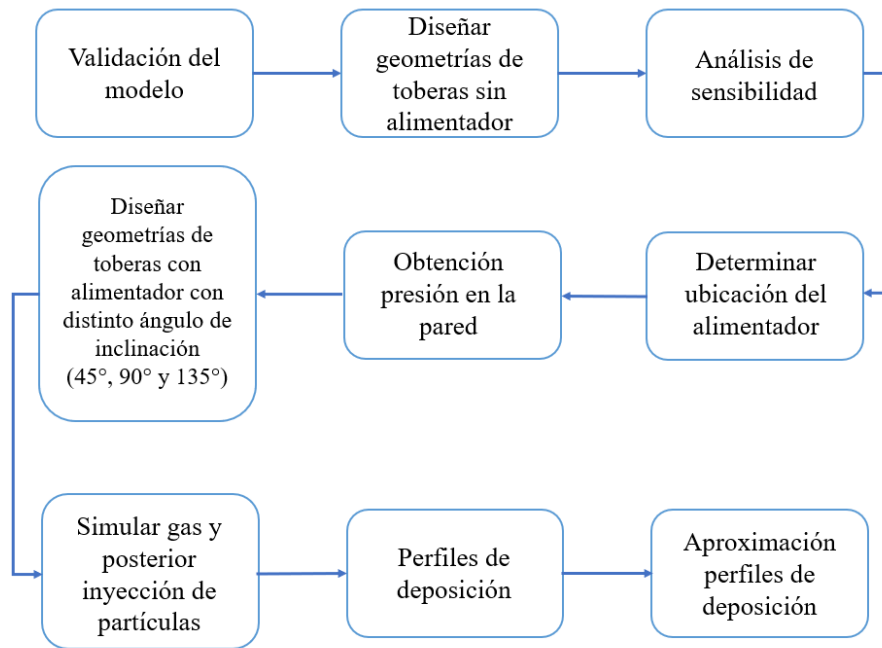


Figura 4.1. Esquema de la metodología del presente trabajo de investigación.

Con respecto al ángulo de inclinación que se modifica para observar el efecto de éste en los perfiles de deposición, se define en la Figura 4.2, donde se observa este ángulo de inclinación, el cual corresponde a α .

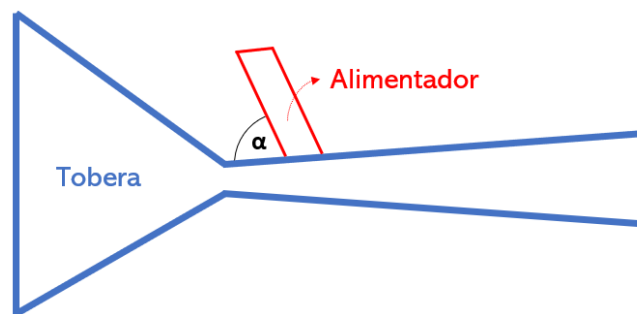


Figura 4.2. Ángulo de inclinación α entre tobera y alimentador. En rojo el alimentador y en azul la tobera.

4.1. Definición de la investigación

En el presente trabajo de investigación se verificó el efecto que produce en los perfiles de deposición el cambio en el ángulo de inclinación del alimentador de toberas planas. Los valores utilizados para el ángulo de inclinación corresponden a 45° , 90° y 135° , por lo que se cuenta con tres diseños distintos de tobera, que difieren en su alimentador. Las geometrías utilizadas, debido a que se utilizan toberas planas, se diseñan en dos dimensiones (*2D Space: Planar*).

La variación en el ángulo de inclinación produce cambios en cómo las partículas ingresan a la tobera y, por lo tanto, en los perfiles de deposición. La finalidad de la presente investigación es relacionar el comportamiento de las partículas desde que ingresan por el alimentador hasta que impactan con el sustrato con el ángulo de inclinación que presenta cada tobera.

Para lograr lo señalado anteriormente, se simuló cada volumen de control mediante el software ANSYS (versión 18.2) en computadores con procesador de 4 núcleos de 2,8 GHz y 8 Gb de memoria RAM. La simulación se realiza en dos dimensiones para cada volumen de control y se simula el flujo de gas (nitrógeno) que circula por la tobera. Las condiciones iniciales impuestas para este gas son las que se detallan en la

Tabla 4.1, en donde la salida corresponde al ambiente que es la zona en la cual es eyectado el flujo de gas, ésta es considerada a presión atmosférica y temperatura ambiente.

Tabla 4.1. Condiciones iniciales del flujo de gas (nitrógeno).

Zona	Presión relativa [Pa]	Temperatura [K]
Entrada tobera	1.622.675	623
Entrada alimentador	460.000	300
Salida (ambiente)	0	300

La simulación es realizada en régimen transiente, el *solver* utilizado corresponde a *Density-Based*, el modelo viscoso usado corresponde a k- ϵ estándar y la turbulencia en el gas es incorporada mediante el modelo *Discrete Random Walk* (DRW). Además, las paredes de la tobera son consideradas adiabáticas, por lo que no hay intercambio de calor con el ambiente.

Una vez que el gas es simulado, es decir, su solución ha convergido, se inyectan partículas utilizando el tipo de inyección de superficie (*Type injection: surface*) desde la entrada del alimentador (*inlet 2*). Las partículas añadidas poseen una distribución de diámetros conocida y corresponden a partículas de cobre (Cu-159). Con respecto a esta distribución, es ajustada a una distribución Rosin-Rammler.

Posterior a la inyección, se obtienen los resultados de las partículas que fueron arrastradas por el flujo de gas. Los resultados utilizados corresponden a la posición, temperatura y velocidad de cada partícula y mediante éstos se obtienen dos perfiles de deposición para cada tobera. Un perfil de deposición considerando que todas las partículas se adhieren y otro considerando sólo las partículas que superan su velocidad crítica.

El perfil de deposición es obtenido considerando las partículas esféricas y acumulando el volumen de éstas para cada posición del sustrato que fue previamente discretizado.

4.2. Validación

Para validar el modelo a utilizar, se escogió como referencia el trabajo de A. Sova y compañía, “*Deposition of aluminum powder by cold spray micronozzle*” [10]. En éste se utiliza una microtobera De Laval convergente-divergente como se muestra en la Figura 4.3. Esta tobera posee un largo de 20 mm -zona divergente-, diámetro de garganta de 0,5 mm y diámetro de salida de 1 mm, medidas que la hacen única por su diminuto tamaño.

La investigación de este artículo se divide en dos partes, primero se realizan mediciones experimentales de las velocidades de partículas a la salida de la tobera y luego estos resultados son comparados con mediciones de simulación numérica.



Figura 4.3. Microtobera De Laval convergente-divergente comparada con una moneda de 10 céntimos de euro [21].

Con respecto al trabajo experimental, se utiliza la tobera de la Figura 4.3 en el proceso de *cold spray*, en donde el gas empleado es helio a una presión de 5 MPa en la entrada y presión atmosférica en la salida (0,101 MPa), la temperatura de entrada y salida corresponden a temperatura ambiente (300 K).

Estudios predicen que partículas de aluminio de diámetros inferiores a ~20-30 μm alcanzarían una velocidad mayor a la velocidad crítica durante la aceleración en la microtobera, bajo condiciones similares a las señaladas [22], por lo que para mejorar la eficiencia de deposición,

lo ideal sería utilizar un polvo con partículas de este diámetro, sin embargo, producto de la fineza y baja fluidez que tendría un polvo compuesto sólo por partículas de diámetros inferiores a ~20-30 μm , éste no podría ser expulsado a baja tasa de alimentación, que es lo que se requiere en *cold spray*. Es por este motivo que la distribución de diámetros utilizada -y todas las distribuciones utilizadas para este proceso de manufactura- también considera diámetros superiores a 30 μm , como se muestra en la Figura 4.4, que es la distribución de diámetros utilizada en la investigación de A.Sova.

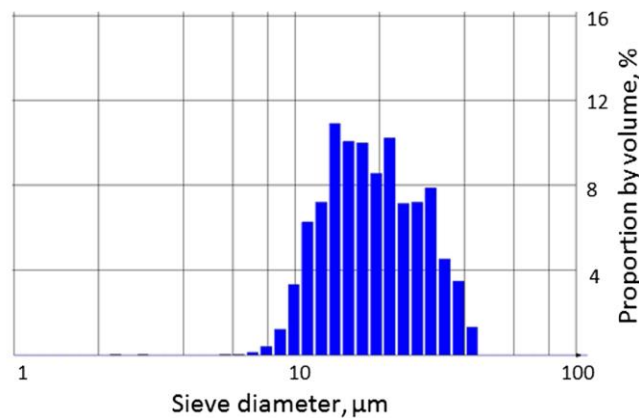


Figura 4.4. Distribución de diámetros de partículas de aluminio utilizadas en mediciones experimentales [21].

El método conocido como “*Particle Tracking Velocimetry*” (PTV) es utilizado para medir la velocidad de las partículas a la distancia de 1-6 mm de la salida de la tobera, esto se logra utilizando una cámara de alta velocidad y una fuente lumínica externa. La cámara de alta velocidad se configura a un tiempo de exposición de 1 μs . Por consiguiente, mediante este arreglo se logran fotografiar imágenes de las trayectorias de las partículas de aluminio en la zona de medición, las cuales reflejan la luz de la fuente lumínica externa, como se muestra en la Figura 4.5, cabe mencionar que este método no detecta partículas de diámetro inferior a 10 μm . Finalmente, dado que se conoce la distancia recorrida por las partículas en el tiempo de exposición y la distribución de partículas, se obtiene la velocidad media de éstas, que corresponde a 607 m/s.

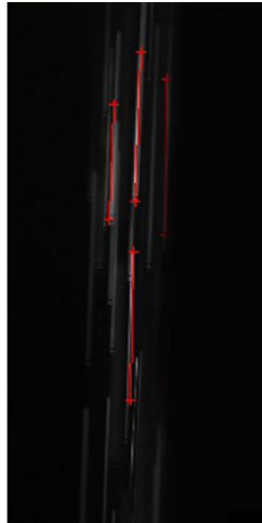


Figura 4.5. Trayectoria de partículas de aluminio (segmentos en rojo) que fueron iluminadas por una fuente externa, con un tiempo de exposición de 1 μ s. [22].

Con respecto a la simulación numérica -utilizando el software FLUENT v18.2- se calcularon las velocidades y temperatura de impacto de partículas de aluminio de diámetros entre 5 μ m y 45 μ m. Las condiciones termodinámicas iniciales, la geometría de la tobera y el gas utilizado son los mismos que para el caso de las mediciones experimentales.

Un modelo 2D axisimétrico es utilizado y el mallado del dominio de trabajo posee aproximadamente 350.000 elementos. El gas -helio- se considera como un gas ideal y compresible. Con respecto al modelo utilizado para considerar la viscosidad del flujo, se configura el modelo k- ϵ estándar. Por último, para añadir un modelo estocástico que considere los efectos de la turbulencia en la trayectoria de las partículas, se utiliza el modelo *Discrete Random Walk* (DRW).

Para la simulación en sí, se comenzó simulando el gas hasta obtener el estado estacionario de éste. Luego, para lograr lo señalado, se configuraron los modelos a utilizar y condiciones termodinámicas iniciales. El *solver* utilizado corresponde a *Density-Based* en modo transiente, ya que en este tiempo -transiente- se generan vórtices, los cuales obligan a trabajar con un *time step* pequeño y en este modo para evitar la divergencia de la simulación. Una vez obtenido este resultado, se añadieron las partículas de aluminio esféricas sobre el gas, por lo cual esta simulación no considera la interacción dinámica entre el gas y partículas.

En la Figura 4.6, se presentan los resultados de la simulación numérica obtenidos en esta investigación, específicamente, la temperatura y velocidad de impacto. En relación a estos resultados, los valores extremos superiores corresponden a valores máximos, los extremos inferiores a valores mínimos y los cuadrados a valores promedio.

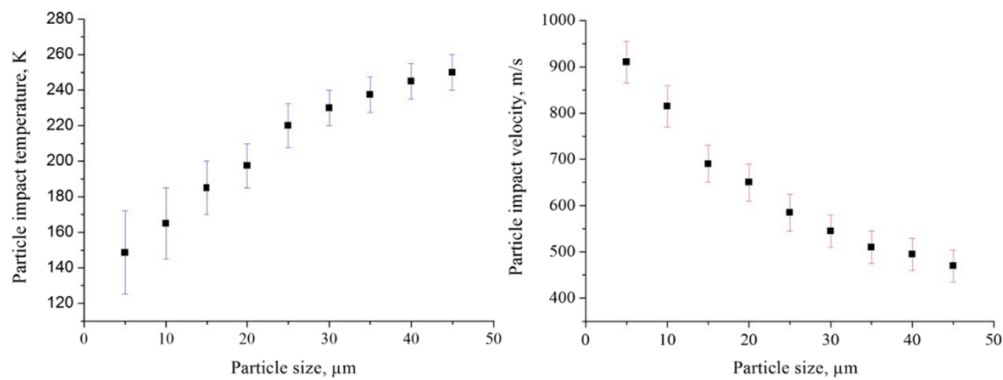


Figura 4.6. Resultados obtenidos mediante simulación numérica por A. Sova. Temperatura de impacto (izquierda) y velocidad de impacto (derecha) para distintos diámetros.

En el capítulo **5. Validación** se enseñan los resultados obtenidos en la presente investigación en comparación con los resultados de A. Sova, específicamente, se obtienen las temperaturas y velocidades de impacto mediante simulación numérica. Además, se predice la velocidad media del polvo a partir de los resultados numéricos y son comparados con la velocidad media obtenida de manera experimental por A. Sova (607 m/s). En base a este último resultado se verifica si el modelo a utilizar es válido, esto en caso de que el error no sea superior al 10%.

4.3. Modelo definitivo

Antes de comenzar la simulación se debe definir la geometría de la tobera, mallado de la misma y el modelo utilizado, es decir, la serie de configuraciones necesarias para llevar a cabo la simulación. Por consiguiente, en esta sección se presenta todo el detalle respecto a las etapas previas a la simulación.

Asimismo, con la finalidad de hacer más fácil de comprender y replicar las configuraciones utilizadas, en las secciones que se requiera el uso de ANSYS, se presenta paso a paso cómo configurar el modelo utilizado para, en caso de ser necesario, replicar los resultados de esta investigación. Si se hace caso omiso a algún valor o configuración significa que se utilizó el valor por defecto entregado por el *software*.

Por último, todas las simulaciones -a excepción de la simulación realizada en la sección de validación- y parámetros termodinámicos que se mencionan en este documento se realizan en base a las configuraciones señaladas a continuación.

4.3.1. Geometría del volumen de control

En la presente investigación se utilizó una tobera plana, es decir, una tobera que su geometría principal radica en dos dimensiones (la tercera dimensión es una réplica de la geometría de las otras dos dimensiones, por lo cual, esta dimensión corresponde al espesor de la tobera). Las toberas usualmente utilizadas en *cold spray* corresponden a toberas cilíndricas, sin embargo, la fácil fabricación de una tobera plana -en comparación a una tobera cilíndrica- conllevan a realizar la investigación en base a este tipo de tobera, teniendo en consideración una futura validación experimental de los resultados obtenidos en este trabajo. En la Figura 4.7 se puede apreciar una tobera plana comercial a modo de ejemplo.



Figura 4.7. Tobera plana comercial Karcher (Flat jet nozzle, XXL).

Luego, dada la simplicidad de la geometría que presenta este tipo de toberas -planas- se realiza una geometría en dos dimensiones para realizar las simulaciones.

Para determinar la geometría de la tobera plana a utilizar, se usó como referencia una tobera comercial (*Ultife Modular Nozzle* de la marca *SST, Centreline*), la cual posee las siguientes dimensiones (donde " L " corresponde a largo y " ϕ " a diámetro):

- $L_{convergente} = 20,0 \text{ mm}$
- $L_{divergente} = 133,0 \text{ mm}$
- $\phi_{entrada} = 12,8 \text{ mm}$
- $\phi_{garganta} = 2,0 \text{ mm}$
- $\phi_{salida} = 6,4 \text{ mm}$

Luego, en base a estas dimensiones, la tobera plana es diseñada utilizando como parámetro principal el área transversal de la tobera comercial, ya que como se puede observar en la ecuación (3.1), el área transversal es el parámetro que se relaciona de manera directa con la velocidad del gas.

En la Tabla 4.2 se presentan las áreas transversales de la tobera comercial (área garganta y salida). Estas áreas se usaron como referencia para el diseño de la tobera plana, ya que la sección transversal de esta tobera -que posee forma de rectángulo- debe tener la misma área que la sección transversal de la tobera comercial -que posee forma de circunferencia-, donde el ancho de este rectángulo es la profundidad o grosor de la tobera plana, que se define de 2 mm.

Cabe destacar que el área de la sección de entrada del gas no es un parámetro restrictivo, ya que las grandes variaciones en el comportamiento del gas en el interior de la tobera se producen desde la sección de la garganta hasta la salida de ésta. Es por este motivo que el área de entrada no es considerada para este análisis, por lo tanto, las dimensiones de la tobera plana en la entrada del gas se definen por el usuario -dentro de márgenes razonables-.

Tabla 4.2. Áreas transversales tobera comercial.

Ubicación	Área [mm^2]
Garganta	3,1
Salida	31,7

Finalmente, en lo que respecta la geometría del volumen de control, se definen las condiciones de borde de ésta. Específicamente, por dónde ingresa el gas (“inlet”), por dónde sale (“outlet”) y qué zonas corresponden a las paredes de la tobera (“wall”). En la Figura 4.8 se aprecian estas zonas, además de ser un bosquejo del diseño requerido para este trabajo, que es una tobera con alimentador más una zona de *free jet* (zona encerrada por *Outlet*), los cuales en conjunto conforman el volumen de control.

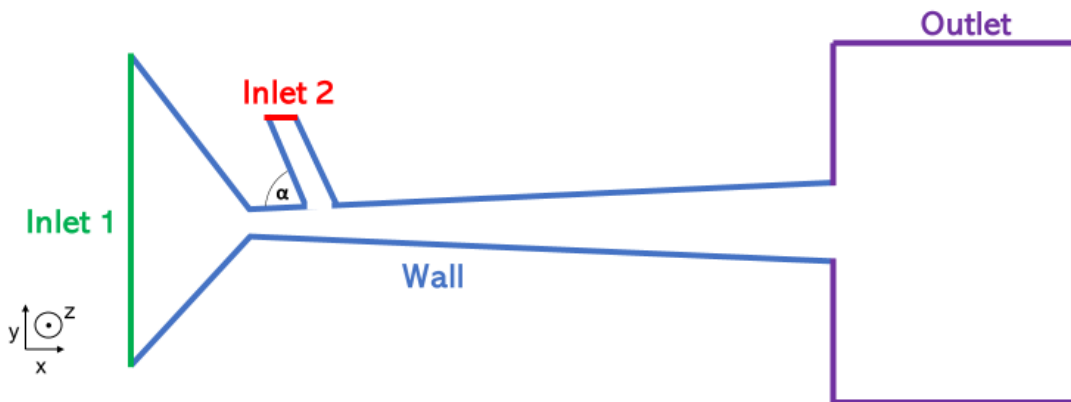


Figura 4.8. Condiciones de borde del volumen de control. En verde y rojo la entrada del gas, en azul las paredes y en morado la salida del gas -zona free jet-.

La geometría de la tobera ilustrada en la Figura 4.8 requiere de una zona en la cual pueda ser afirmada mediante una rosca o hilo con la sección de alimentación de gas. En consecuencia, dado que el largo de la sección convergente sólo mide 20 mm y sus paredes no son horizontales, se procede a modificar la geometría por una que mantenga la sección transversal pero que aumente el largo de la zona convergente. Por consiguiente, la geometría utilizada en esta investigación corresponde a la que se puede observar en la Figura 4.9, en donde se extiende la sección convergente de la tobera en 20 mm.

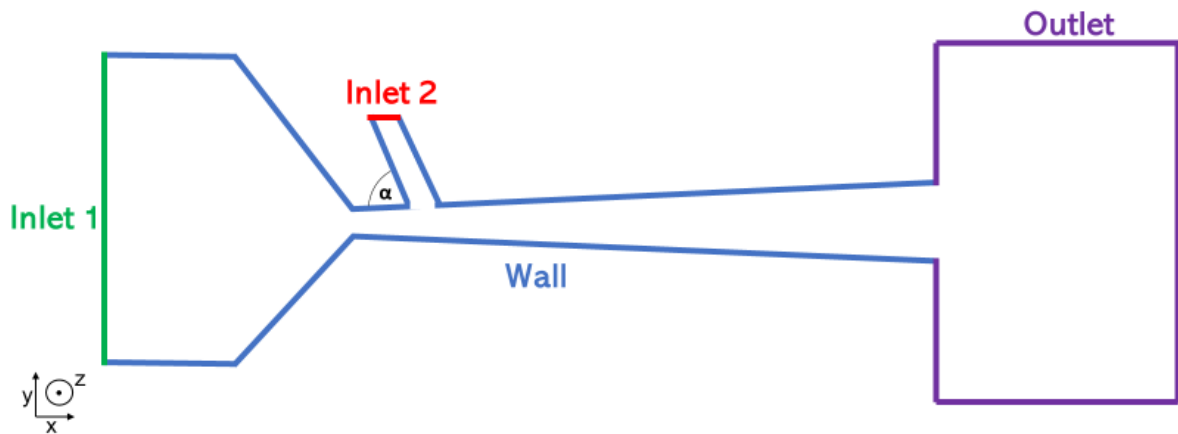


Figura 4.9. Bosquejo definitivo del volumen de control (tobera más zona de free jet) con las condiciones de borde indicadas.

4.3.2. Mallado del volumen de control

El mallado, por tanto, se realizó en base a la geometría que se obtuvo del volumen de control definitivo, el cual cuenta con todas las restricciones señaladas previamente. Además, el mallado posee tamaños de elementos variable, es decir, los elementos poseen tamaños distintos dependiendo las secciones del volumen de control. Estas secciones se definen en base al comportamiento del fluido dentro del volumen de control.

Por consiguiente, en las zonas donde el comportamiento del fluido sea más caótico, se utilizó un mallado con tamaño de elemento menor, es decir, un mallado más fino. En el caso contrario, en las zonas donde el flujo de gas presenta un comportamiento más uniforme, se utilizó un mallado más grueso, es decir, con un tamaño de elemento mayor.

Otra característica importante a señalar en relación al mallado, es que éste posee elementos con geometría cuadrilátera, lo cual significa que todos sus elementos poseen cuatro lados -esta es la configuración que se define en el *software*, sin embargo, producto de los tamaños de los elementos en el volumen de control, suelen generarse triángulos en el mallado, los cuales son muy pocos en comparación a todos los elementos-. Para activar esta configuración, en la sección de mallado (*Meshing*) de ANSYS, se debe ir a la sección *Mesh* → *Automatic Method* → *Definition* → *All Quad*. Al seleccionar la opción *All Quad*, se está activando la configuración señalada.

Luego, en la Figura 4.10 se observa el bosquejo del volumen de control final con sus respectivas secciones de mallado. Cada una de estas secciones posee un tamaño de elemento diferente, el tamaño que se utilizó para cada sección depende del número de elementos que se utiliza para el volumen de control definitivo, sin embargo, hasta el momento no se cuenta con este valor (este valor se obtiene en el capítulo **6.2. Análisis de sensibilidad**).

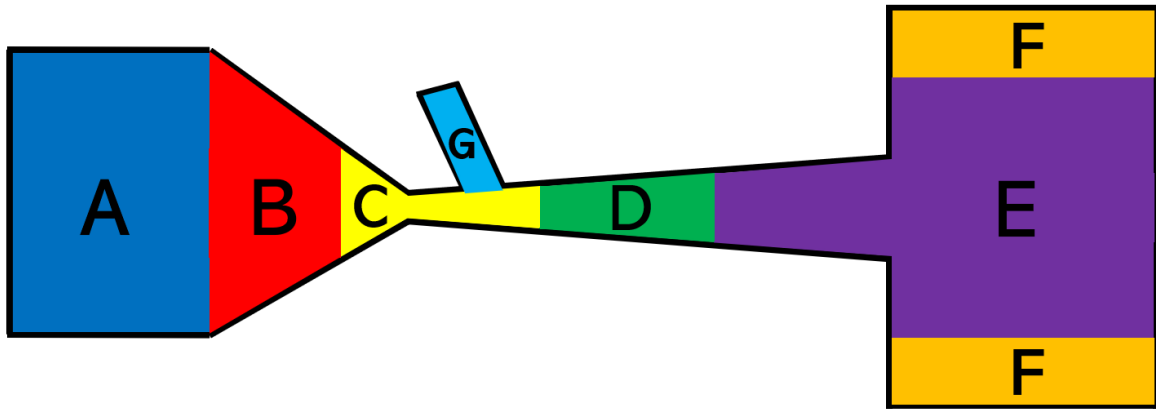


Figura 4.10. Bosquejo volumen de control final con las secciones de mallado.

En consecuencia, dado que no se conoce el número de elementos del volumen de control definitivo, no se puede definir el tamaño de elemento para cada sección. En la Tabla 4.3 se presenta en orden decreciente el tamaño de elemento que debe poseer el mallado de cada sección, es decir, la sección que se encuentra en la parte superior corresponde al mallado más fino (menor tamaño de elemento) y la que se encuentra en la parte inferior al mallado más grueso (mayor tamaño de elemento).

Tabla 4.3. Secciones de mallado del volumen de control definitivo, presentadas en orden decreciente con respecto a la fineza del mallado.

Tamaño de elemento ↓	Sección	Color
	C	Amarelo
	G	Azul
	D	Verde
	E	Púrpura
	B	Rojo
	A	Azul
	F	Amarillo

4.3.3. Configuraciones previas a la simulación (*Setup*)

Primero, a modo general, se definen las características del *solver* a utilizar en la simulación del gas y qué modelos matemáticos se requirieron para la simulación. Lo señalado se detalla en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Detalle del *solver* y modelos utilizados para las simulaciones.

<i>Solver</i>	
<i>Type</i>	<i>Density-Based</i>
<i>Velocity Formulation</i>	<i>Absolute</i>
<i>Time</i>	<i>Transient</i>
<i>2D Space</i>	<i>Planar</i>
<i>Models</i>	
<i>Energy</i>	<i>On</i>
<i>Viscous</i>	<i>Standard k-epsilon</i>

La simulación se realizó en régimen transiente debido a que en este intervalo de tiempo se generan vórtices, los cuales provocan que la simulación diverja si se trabaja en régimen estacionario. Por otro lado, no existen ejes de simetría en la geometría a utilizar (debido al alimentador) por lo que se trabaja en un espacio “*planar*”. Finalmente, se activó la ecuación de conservación de energía y se utilizó el modelo k-épsilon estándar con un tratamiento de pared estándar (*Near-Wall Treatment: Standard Wall Functions*).

Luego, se definió en la sección de materiales-fluidos qué gas se utiliza, por lo cual se seleccionó nitrógeno, las propiedades físicas de este elemento se encuentran almacenadas en el mismo *software*. Importante en este paso es modificar la densidad del gas a gas ideal (por defecto entrega la densidad en condiciones normales), debido a que se utilizó la densidad variable según la ecuación de la ley de los gases ideales. Posterior a este paso, se indicó que el fluido a utilizar corresponde al añadido, esto se efectuó en la sección de condiciones de la celda, específicamente, *Cell Zone Conditions* → *solid_surface_body* (nombre del volumen de control) → *Material Name* → *Nitrogen*.

Realizado lo anterior, se procedió a definir las condiciones termodinámicas iniciales del volumen de control en las zonas borde del mismo (Figura 4.8), entre las condiciones a definidas se encuentran la presión y temperatura inicial. Para el caso de la presión, el *software* solicita dos presiones, por un lado, *Gauge Total Pressure* que corresponde a la presión relativa y por otro, *Initial Gauge Pressure* que es una presión inicial arbitraria para inicializar la simulación -ésta debe ser un poco más baja a la presión *Gauge Total Pressure*-. Las presiones solicitadas son presiones relativas a la presión atmosférica, para modificar la presión de referencia se puede realizar en la misma sección de condiciones de borde (*Boundary Conditions*) y luego seleccionando *Operating Conditions*, en la ventana que se abre se puede modificar esta presión de referencia (*Operating Pressure*), que para esta investigación se utiliza un valor de 101.325 Pa, presión atmosférica (valor por defecto).

Los parámetros mencionados se resumen en la Tabla 4.5, donde los valores de las presiones para la zona de entrada del gas en el alimentador (“*”) no son conocidos hasta el momento, sin embargo, en la sección **6.4. Alimentadores** se detallan estos valores y en la sección **4.7. Alimentadores**, se indica cómo obtenerlos.

Tabla 4.5. Condiciones termodinámicas iniciales del volumen de control.

Zona	Gauge Total Pressure [Pa]	Initial Gauge Pressure [Pa]	Temperatura [K]
<i>Inlet 1</i>	1.622.675	1.622.600	623
<i>Inlet 2</i>	*	*	300
<i>Outlet</i>	0	-	300

Con respecto a los valores mostrados en la Tabla 4.5, la temperatura de entrada del gas en el alimentador (“*inlet 2*”) y la salida del gas (“*outlet*”) corresponde a temperatura ambiente y la presión de entrada del gas en la tobera (“*inlet 1*”) corresponde a 235 psi, la cual en unidades del sistema internacional, se traduce en el valor mostrado, 1.622.675 Pa.

Posterior a las condiciones de borde, se procedió a definir los métodos que se utilizaron para la discretización numérica. En la sección *Methods* → *Solution Methods* se utilizaron las configuraciones mostradas en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Discretización numérica en sección de métodos.

<i>Solution Methods</i>	
<i>Formulation</i>	<i>Implicit</i>
<i>Flux Type</i>	<i>ROE-FDS</i>
<i>Spacial Discretization</i>	
<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
<i>Flow</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>

Para poder monitorear la simulación mientras ésta se encuentra en curso, se utilizaron gráficos de presión, temperatura y velocidad en función del tiempo de iteración en la zona de salida del fluido -*outlet*-. De esta manera es posible observar las fluctuaciones de estos parámetros y ser capaz de determinar cuándo la simulación ha convergido -además del monitor de residuos que por defecto es mostrado durante la simulación-. Para activar estos gráficos, se configuran desde la sección *Solving* → *Definitions* → *New* → *Surface Report* → *Area-Weighted Average...*, donde se abre una ventana en la cual se configura el nombre del gráfico, se selecciona la zona dónde analizar (seleccionar *Surfaces: outlet*), el parámetro a analizar (seleccionar *Field Variable: Pressure/Velocity/Temperature*) y se crea el gráfico con su respectivo archivo de respaldo (Activar *Create* → *Report File & Report Plot*). Con estas configuraciones, al momento de iniciar la simulación se mostrarán los monitores de residuos, presión, temperatura y velocidad. Se considera que la simulación ha convergido, en base a estos monitores, cuando las fluctuaciones de los

parámetros sean mínimas, o incluso, no existan -esto debe ocurrir para todos los parámetros monitoreados-.

Con respecto a los residuos, se configuró que cuando éstos alcancen un valor inferior a 10^{-6} , la simulación se detiene de manera automática (esto se realiza en la sección *Monitors* → *Residuals* → *Absolute Criteria*, en esta sección se pueden modificar los valores para los residuos de continuidad, velocidades, energía y épsilon), sin embargo, no es necesario que esto suceda para considerar que la simulación ha convergido, ya que se deben chequear los monitores mencionados previamente.

Como recomendación, se sugiere activar la opción de autoguardado para tener un respaldo en caso de cualquier interrupción durante la simulación, esto se realiza en la sección *Calculations Activities* → *Autosave (Every Time Steps)*, aquí se abre una ventana en la cual se define la cantidad de *time steps* necesarios para autoguardar, en este caso se configura para 200 *time steps*, por lo tanto, se selecciona *Save Data File Every (Time Steps): 200*.

Sólo falta inicializar el volumen de control e iniciar la simulación en sí, para realizar estos pasos, se procedió a inicializar de manera híbrida en base a las condiciones de borde previamente definidas (*Initialization* → *Solution Initialization* → *Hybrid Initialization* → *Initialize*). Posterior a la inicialización, en la sección *Run Calculation* se definió el tamaño del *time step* y cuántos *time steps* se realizarán, además de la cantidad máxima de iteración para cada *time step*. Los valores configurados corresponden a los siguientes, *Time Step Size: 1e-08*, *Number of Time Steps: 300.000* y *Max Iterations/Time Step: 20*. Cabe destacar que el número de *time steps* (*Number of Time Steps*) se debe aumentar y volver a comenzar la simulación donde quedó en caso de que ésta haya cumplido la cantidad de *time steps* y no haya convergido, es decir, en los monitores aún se observan variaciones considerables en los parámetros.

Finalmente, posterior a las configuraciones realizadas se procedió a iniciar la simulación mediante la opción *Calculate* que se encuentra en la sección *Run Calculation*.

4.3.4. Inyección de partículas

Una vez que el gas ha sido simulado y, por lo tanto, la solución ha convergido, se procedió a añadir las partículas de metal (partículas de cobre, que serán detalladas en la sección **4.4. Polvo metálico**) en el gas. Para realizar esto, se presenta de igual manera que en la sección anterior cómo añadir las partículas, es decir, paso a paso.

La adición de partículas se realizó sobre el gas ya simulado, por lo cual, no se considera el efecto dinámico que generan éstas sobre el gas.

Para comenzar, se debe activar la opción *Discrete Phase Model* (DPM) en la sección *Models*, al activar esta opción se abre una ventana (*Discrete Phase Model*) en la cual se desactiva la opción *Particle Treatment* → *Unsteady Particle Treatment* y en la pestaña *Numerics* se modifica la tolerancia (*Tolerance*: 1e-06) y el máximo de refinamiento (*Max. Refinements*: 100). Posterior a estos pasos, se procedió a modificar la inyección en sí, por lo que en la misma ventana, se seleccionó *Injections...*, se abrirá una ventana (*Injections*) en la cual aparecen todas las inyecciones creadas y cuenta con la opción para crear inyecciones, por lo que se seleccionó *Create* para crear una, posterior a esto, se abrirá una nueva ventana (*Set Injection Properties*) en la cual se encuentra todo el detalle de cómo serán añadidas las partículas y las propiedades geométricas de éstas.

Previo a modificar los parámetros de la ventana *Set Injection Properties* se procedió a definir el material de las partículas que se inyectarán, esto se realiza en la sección *Materials* → *Inert Particle* → *anthracite* (que es el material que añade por defecto ANSYS), se abrirá una ventana (*Create/Edit Materials*), aquí se modificó el nombre del material a “Cobre” y se ingresaron los valores de su densidad y calor específico, es decir, 8.960 kg/m³ y 390 J/kgK.

Una vez definido el material a inyectar, se procedió a modificar las propiedades de éste en la ventana *Set Injection Properties*. En esta ventana se puede modificar el nombre de la inyección (se utilizó “Partículas de cobre”), se seleccionó el tipo de inyección a superficie (*Inyection Type: surface*) y luego la superficie de inyección, que corresponde al alimentador (*Release From Surfaces: Inlet2*). Posterior a esto, se seleccionó el tipo de partícula a inerte (*Particle Type: Inert*), el material por el previamente modificado (*Material: Cobre*), la distribución de diámetros por Rosin-Rammler (*Diameter Distribution: rosin-rammler*). Luego, se procedió a indicar los parámetros de la distribución de diámetros y la temperatura inicial de las partículas, esto se definió en la pestaña de propiedades (*Point Properties*), los valores utilizados se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Configuración inyección de partículas para pestaña *Point Properties*.

Parámetro	Valor
<i>Temperature</i> [K]	300
<i>Total Flow Rate</i> [kg/s]	1,00e-20
<i>Min. Diameter</i> [m]	5,00e-06
<i>Max. Diameter</i> [m]	4,50e-05
<i>Mean Diameter</i> [m]	1,35e-05
<i>Spread Parameter</i>	2,5782
<i>Number of Diameters</i>	15

Luego, en la pestaña de modelos físicos (*Physical Models*) se activó el arrastre de partículas por *high-Mach Number* (*Drag Parameters* → *Drag Law* → *high-Mach Number*). Finalmente, con respecto al modelo estocástico producto de las turbulencias del fluido, se activó el modelo *Discrete Random Walk* (*Stochastic Tracking* → activar *Discrete Random Walk Model*) para un número de 30 intentos (*Number of Tries*: 30) y escala de tiempo constante de 0,15 (*Time Scale Constant*: 0,15), esto implica que se realizarán 30 inyecciones de la misma partícula y bajo las mismas condiciones iniciales desde el mismo punto.

Las configuraciones previamente señaladas entregaron un total de 7.200 partículas con una distribución de diámetros según la distribución de Rosin-Rammler, por lo que los perfiles de deposición tendrán 7.200 partículas para cada propuesta de alimentación.

Para obtener los resultados de las partículas inyectadas en el fluido, se procedió a realizar lo siguiente, ir a la sección *Results* → *Graphics* → *Particle Tracks* → *particle-tracks-1*. Posterior a esto se abrirá una ventana (*Particle Tracks*) la cual cuenta con una serie de opciones para poder extraer los datos de las partículas. Los datos son extraídos mediante archivos de texto que contienen en detalle la información de cada una de las partículas, estos archivos poseen un formato “.xy” que es posible abrir mediante cualquier programa lector de documentos de texto, como el “Bloc de notas” de Windows, por ejemplo. Por consiguiente, para obtener los datos de las partículas se realizó lo siguiente, en la ventana *Particle Tracks* se activaron las opciones de mostrar gráfico y guardar archivo (activar *XY Plot* y *Write to File* en la sección *Options*), luego se seleccionó la inyección que se creó previamente (*Release from Injections*: “Partículas de cobre”), posterior a esto se seleccionó el parámetro independiente de la función, entre los que se pueden seleccionar distancia recorrida y tiempo, para este caso se utilizó tiempo (*X Axis Function*: *Time*) y finalmente se seleccionó el parámetro dependiente de la función, por lo tanto, este paso se realizó para la velocidad en el eje x, posición eje x, posición eje y, temperatura y diámetro de la partícula (*Y Axis Function* → *Particle Variables...* → *Particle X Velocity* / *Particle X Position* / *Particle Y Position* / *Particle Temperature* / *Particle Diameter*, respectivamente). Para seleccionar la ubicación de guardado se utiliza el botón que se encuentra en el inferior de la ventana *Save/Write...*, una vez realizado este paso ya se cuenta con el archivo guardado en el disco de almacenamiento del computador. Estos archivos son los utilizados para el post procesado y, por consiguiente, los necesarios para obtener los perfiles de deposición.

4.4. Polvo metálico

Como se mencionó anteriormente, el polvo metálico utilizado en las simulaciones es cobre, el cual posee una distribución de diámetros conocida. La distribución utilizada corresponde a una distribución comercial Cu-159 (ésta se encuentra en el capítulo de Anexos, Anexo A).

Esta distribución es utilizada para obtener los parámetros del ajuste a la distribución Rosin-Rammler que se utilizó en las configuraciones del *software*. Por consiguiente, como se puede observar en la Tabla 4.2 y la Figura 4.11 (que detallan la distribución de diámetros), el polvo metálico utilizado posee su mayor concentración para diámetros cercanos a 10 μm , sus diámetros más pequeños rondan los 5 μm y los más grandes los 25 μm -la presencia de diámetros superiores a 25 μm es marginal-.

Los parámetros obtenidos referente a la distribución de diámetros Rosin-Rammler se detallaron en la sección **4.3.4. Inyección de partículas**, en la Tabla 4.7 específicamente.

Tabla 4.8. Detalle de distribución de diámetros polvo metálico de cobre (Cu-159).

Diámetro [μm]	Cantidad [%]
44,00	0,21
37,00	0,47
31,11	0,79
26,16	1,51
22,00	3,14
18,50	6,63
15,55	12,68
13,08	19,57
11,00	21,93
9,25	17,18
7,78	9,43
6,54	4,03
5,50	1,57
4,62	0,65
3,89	0,21

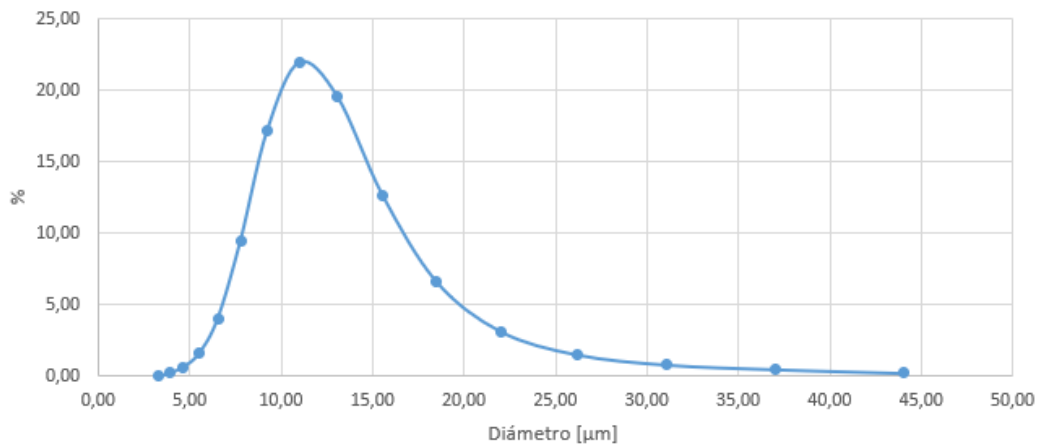


Figura 4.11. Gráfico de distribución de diámetros polvo metálico de cobre (Cu-159). Datos de Tabla 4.8.

4.5. Análisis de sensibilidad

Con la finalidad de determinar el número de elementos que tendrá el mallado final, es decir, el mallado de la geometría con los distintos arreglos de alimentación de partículas, se realizó un análisis de sensibilidad. Éste consiste en utilizar distintos mallados para la misma geometría, con la particularidad de que cada mallado posee una cantidad de elementos distinta.

Luego, a estos mallados se les configuraron las condiciones de borde y termodinámicas iniciales para comenzar la simulación fluidodinámica del gas. Una vez obtenidos los resultados, se compararon las velocidades máximas alcanzadas por el gas para cada mallado. Posterior a esto, se obtuvo una curva de velocidad máxima del gas en función del número de elementos del mallado.

Finalmente, se obtuvo el error porcentual de los mallados con respecto al mallado más fino (con mayor cantidad de elementos), logrando seleccionar una cantidad de elementos adecuada para las futuras simulaciones. En base a la cantidad de elementos que posee el volumen de control seleccionado mediante este análisis de sensibilidad, se realizó el mallado a la geometría del volumen de control definitivo.

4.6. Ubicación horizontal del alimentador

Para definir la ubicación del alimentador en el eje x, es decir, en la posición horizontal de la tobera, se realizó en base a resultados de distintos diámetros de partículas de cobre añadidas desde distintas ubicaciones en el flujo de gas previamente simulado -bajo las condiciones termodinámicas conocidas y en una tobera sin alimentador-.

Por consiguiente, primero se deben seleccionar ubicaciones candidatas para posicionar el alimentador de la tobera, cabe recordar que la alimentación se realiza posterior a la garganta. Luego, se deben seleccionar también los diámetros de las partículas que se añadirán en el gas.

Posterior a esto, en base a la velocidad crítica de cada partícula, que es conocida debido a que se tienen los parámetros que resuelven la ecuación de velocidad crítica (2.1) -diámetro, temperatura de impacto y temperatura de fusión del cobre-, se procede a discriminar entre las partículas para cada posición y diámetro seleccionado.

Para añadir las partículas en el gas, se utilizó la opción *Injection Type: group*, la cual permite añadir partículas desde un punto inicial (*First Point*) a un punto final (*Last Point*), discretizando de manera equidistante la separación entre estos dos puntos. En base a la discretización realizada, las partículas son inyectadas desde las posiciones que unen el punto inicial con el punto final. Esto último se realizó para simular la adición de partículas en el gas de la forma más coherente y no sólo desde un punto ni desde un alimentador, ya que no son de interés en este momento los efectos producidos por distintos alimentadores. Con respecto a los puntos, el punto de inicio utilizado corresponde al eje de simetría o eje horizontal de la tobera y el punto final es la pared inmediata avanzando por el eje y.

Las partículas añadidas en el flujo corresponden a partículas de cobre de 5, 10, 15 y 20 [um] y son añadidas en posiciones que se encuentran a 5, 15, 20, 25, 30 y 35 [mm] de la garganta, lo cual corresponde en términos de posición horizontal a 45, 55, 60, 65, 70 y 75 [mm], respectivamente,

recordando que la sección convergente mide 40 [mm]. Cabe señalar que para cada posición y diámetro utilizado se utiliza un total de 400 partículas.

Por último, para definir la posición horizontal del alimentador, se consideraron los porcentajes de deposición para cada caso. Seleccionando la ubicación que entregó una mayor deposición para el rango de diámetros con el cual se trabajará.

4.7. Alimentadores

La alimentación de partículas se realiza mediante un extremo que sobresale de la tobera, posterior a la garganta. Este extremo se conecta al depósito de polvo metálico por medio de una manguera o cualquier otro módulo que cumpla la misma función.

La configuración utilizada en esta investigación requiere de un alimentador de partículas externo, el cual consiste en un dispositivo que inyecta el polvo metálico a presión. El uso de este aparato es requerido cuando la presión en el alimentador de partículas, producto del flujo de gas, es mayor a la presión atmosférica -precisamente, la presión a la que se encuentre el ambiente donde se realizará el proceso de *cold spray*-. En el caso de no utilizar este dispositivo y la presión en el interior de la tobera es mayor a la presión en que se encuentra el polvo metálico, éste será expulsado, logrando el efecto opuesto al requerido. En la Figura 4.12 se presenta un alimentador externo de modo ilustrativo, éste corresponde al modelo *AT-1200 Rotary Powder Feeder*.



Figura 4.12. Alimentador de partículas externo, modelo *AT-1200 Rotary Powder Feeder*.

Por consiguiente, para simular los efectos del alimentador externo, es decir, la presión que se requerirá por parte de éste, se debe conocer previamente la presión del flujo de gas bajo las condiciones de operación en la ubicación donde se posicionará el alimentador. De esta manera, se conoce la presión inicial en el alimentador que se impondrá en la configuración previa a la

simulación, obteniéndose los efectos fluidodinámicos en el gas con una tobera que posee un alimentador de partículas.

Para saber la presión a la cual se configurará el alimentador externo, se utilizaron los resultados de simulación fluidodinámica de una tobera sin alimentador bajo las condiciones iniciales conocidas. Luego, se obtuvo la presión del gas en la pared de la tobera donde se ubicará el alimentador. Una vez conocida esta presión, se impone que la presión en el alimentador -nueva geometría de la tobera con alimentador- será igual a esta presión más un delta de presión igual a 10 psi (68.947 Pa), de esta manera se asegura la inyección de las partículas de metal en el interior de la tobera.

En este punto ya se conoce la presión a la cual se configuró el alimentador externo, que es igual a la presión del alimentador de la tobera. Posterior a esto, se proponen 3 configuraciones distintas para el alimentador, específicamente, 3 alimentadores con distinto ángulo de inclinación con respecto a la pared de la tobera. Los ángulos utilizados en esta investigación corresponden a 45°, 90° y 135°, como se indicó previamente.

Finalmente, las restricciones geométricas del alimentador corresponden a que el ancho de éste mide 1/8' (3,175 mm) y el largo 3/4' (19,05 mm), recordando que el espesor -profundidad o eje z de la tobera- mide 2 mm.

4.8. Perfiles de deposición

El perfil de deposición corresponde a la distribución que se genera en el sustrato producto de la deposición de las partículas. Para obtener los perfiles de deposición se utilizan los resultados de las simulaciones fluidodinámicas del gas y posterior adición de partículas sobre éste. Específicamente, se utiliza la velocidad, la posición vertical, la posición horizontal, temperatura y diámetro de cada partícula que es añadida en el gas. Con estos datos es posible obtener la velocidad crítica de cada partícula, además de identificar cuándo las partículas se encuentran en la zona de impacto, es decir, donde se encuentra el sustrato -a 10 mm de la salida de la tobera-. Todo el post procesado de datos se realizó mediante el *software* MATLAB.

Por consiguiente, dado que el diámetro de las partículas es conocido, se calculó el volumen de cada una de éstas, considerándolas partículas esféricas. Luego, este volumen es utilizado para generar el perfil de deposición. Esto se realizó discretizando el sustrato en 200 divisiones, por lo que se procedió a contar cuántas partículas de cada diámetro llegan a cada división del sustrato, lo cual se traduce en cuánto volumen se acumula en cada división del sustrato. El sustrato posee un largo de 20 mm, el cual es ubicado horizontalmente a 10 mm de la salida de la tobera y desde la posición vertical -10 mm hasta +10 mm.

Luego, se tiene la información de cuánto volumen se acumula en cada división, lo cual corresponde al perfil de deposición si se grafica el sustrato en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas el volumen acumulado para cada división del sustrato.

Para el proceso señalado anteriormente se seleccionan las partículas que su velocidad se encuentra sobre su velocidad crítica (recordando que la velocidad crítica es distinta para cada partícula) y también se obtienen perfiles de deposición sin considerar la velocidad crítica, es decir, suponiendo que todas las partículas se adhieren al sustrato. Esto último se realiza para observar el caso ideal en lo que respecta eficiencia de deposición, ya que corresponde a un porcentaje de deposición del 100%.

Además, cabe mencionar que los perfiles obtenidos en esta investigación son aproximaciones a lo que se esperaría en la práctica, ya que existe un factor que no es predecible, el cual corresponde a la turbulencia del gas. Por lo cual la forma del perfil se debe analizar de manera general y no detallada. Igualmente, en la obtención de estos perfiles no se considera la modificación de la superficie de impacto a medida que se van depositando partículas, es decir, si existen partículas depositadas, éstas no afectan a las nuevas partículas por depositar, por lo que la superficie de impacto siempre es la misma y plana -el sustrato-. Si se quisiera considerar este efecto, se debería utilizar la velocidad y temperatura de impacto de cada partícula en la posición real donde impacta -en esta investigación siempre se utiliza como posición horizontal de impacto el sustrato-.

4.9. Flujo de partículas cerca del sustrato

Para poder analizar la distribución de partículas previo al impacto, es decir, conocer el diámetro, temperatura y velocidad en el eje x de las partículas antes de impactar al sustrato se obtienen figuras de la distribución de estos parámetros con los datos de las partículas.

Específicamente, se observa la región cercana al sustrato, las dimensiones de esta región de análisis se definen de 1 mm x 20 mm, tamaño adecuado para observar el flujo de todas las partículas a 1 mm antes del impacto. En la Figura 4.3 se observa la región mencionada.

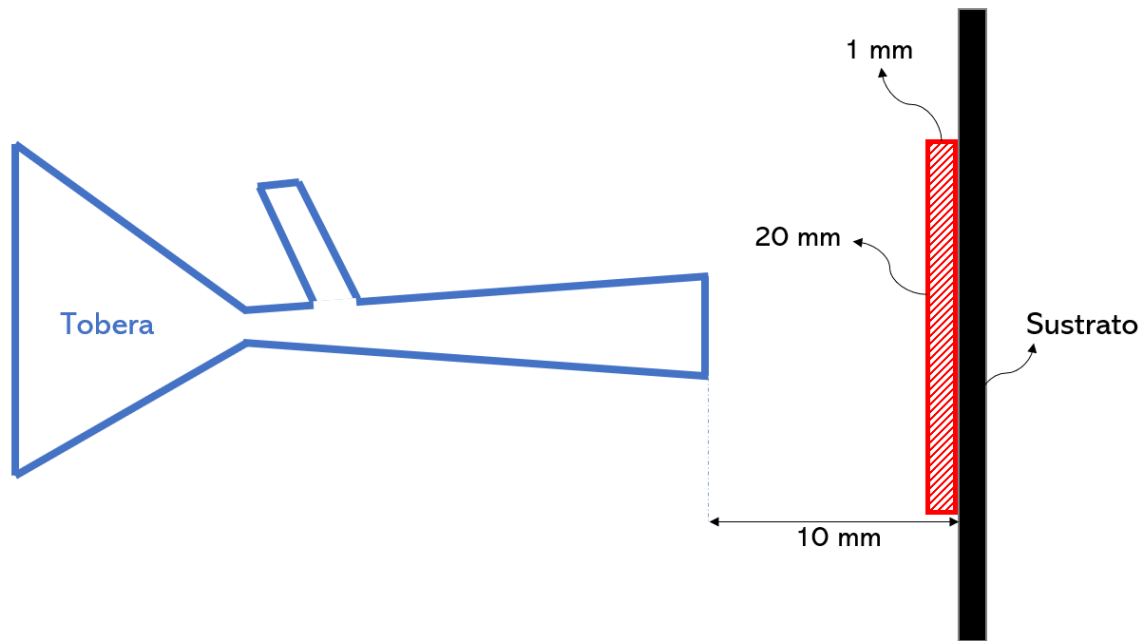


Figura 4.13. Bosquejo tobera y sustrato, donde además se indica la región de análisis (en color rojo) con sus respectivas dimensiones.

Para obtener las distribuciones de diámetro, temperatura y velocidad de las partículas previo a su impacto con el sustrato, se grafica con un punto la posición de la partícula si ésta se encuentra en la región de análisis, además se le añade el color dependiendo del parámetro a analizar, ya sea cualquiera de los señalados anteriormente. Por ejemplo, si una partícula ingresa a la región de análisis será agregada al gráfico del color de su diámetro y si en el siguiente *time step* (que es la siguiente posición de la partícula según los datos de ésta) también se encuentra en la región, se vuelve a añadir al gráfico, y así sucesivamente para cada partícula. De esta forma se obtiene una figura que simula el flujo constante de partículas impactando el sustrato.

4.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas

Dado que la cantidad de partículas simulada corresponde a tan sólo 7.200 para cada diseño de alimentador, se recurre a un método de post procesamiento de datos para simular de mejor manera un proceso de *cold spray* real. Asimismo, de esta manera se obtienen perfiles de deposición con una mejor definición -mejor suavizado- y más realista, ya que se utiliza un número de partículas mucho mayor.

Este método consiste en utilizar una cantidad de partículas, la cual es determinada por el número de partículas requeridas durante un proceso de *cold spray* promedio. Para obtener la cantidad de partículas requeridas, se necesita el valor del flujo másico consumido por este proceso. Se define una tasa de consumo de masa de 90 g/min, por lo cual con este valor y la masa total de las 7.200 partículas se puede obtener la cantidad de partículas necesarias para simular el proceso de *cold spray* durante 2 s.

Para calcular este tiempo se debe tener en consideración que durante el funcionamiento del proceso de *cold spray* la tobera se desplaza por el sustrato o zona que se desea depositar material. Por lo tanto, utilizando la velocidad de movimiento de la tobera o velocidad transversal que se define de un valor de 50 mm/s, se obtiene el tiempo necesario para recubrir los 2 mm de largo del sustrato, que corresponde a 2 s.

Los valores utilizados referentes a la tasa de consumo de masa y velocidad transversal se obtienen en base a valores usados previamente en investigaciones y valores usualmente utilizados en la práctica [24] [25].

Luego, dado que ya se conoce el total de partículas necesarias para simular durante 2 segundos el proceso, se procede a calcular cuántas veces es necesario repetir la inyección de un nuevo grupo de 7.200 partículas, el cual posee partículas con nuevas posiciones de impacto con respecto a la original. Esta nueva posición de impacto vertical se obtiene de manera aleatoria, ya que se utiliza la región de impacto de las 7.200 partículas originales como referencia para cada tobera con sus respectivos puntos de inyección (Figura 4.14) y conjunto de diámetros.

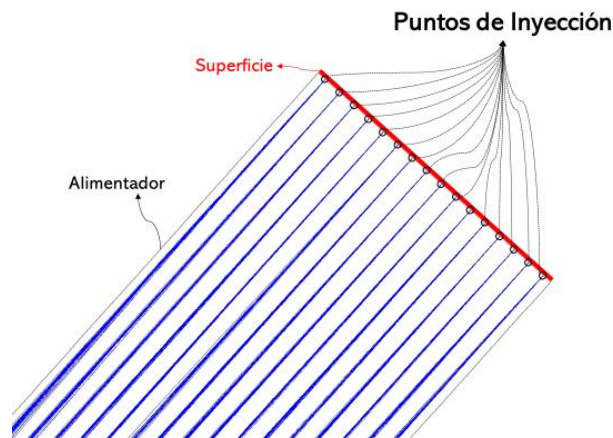


Figura 4.14. Puntos de inyección en superficie mediante Type injection: surface

En la Figura 4.14 se observa el punto de inyección y el flujo de partículas que salen de cada uno de éstos. Cabe recordar que la inyección de partículas se realizó desde una superficie (entrada de alimentador o *Inlet2*), luego esta superficie es dividida en distintos puntos, de los cuales salen 450 partículas de cada uno de éstos. Estas 450 partículas poseen diámetros según la distribución Rosin-Rammler utilizada, por lo tanto, para uno de estos puntos se obtuvo la dispersión de la posición vertical en el impacto del conjunto de partículas que posean el mismo diámetro. De esta manera se tiene la superficie de impacto para cada diámetro de partícula y punto de inyección. En la Figura 4.15 se puede observar la región de impacto con sus respectivos extremos (segmento AB), además el número de curvas corresponde al número de partículas que salen desde cada punto de inyección (*Number of tries*) que se definió previamente como 30.

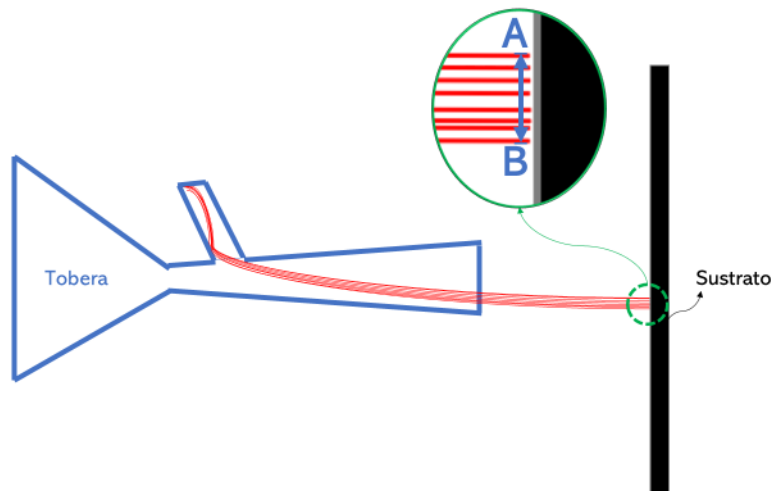


Figura 4.15. Región de impacto o zona de dispersión (segmento AB).

Luego, se conoce la cantidad de nuevos grupos de 7.200 partículas con nuevas posiciones de impacto que se requieren para poder simular el proceso durante 2 segundos. Con estas nuevas partículas añadidas se procede a obtener el perfil de deposición que generan o aproximación del perfil de deposición mediante el mismo método utilizado para el caso donde se utiliza sólo 7.200 partículas. Además, cabe señalar que las limitaciones técnicas en la inyección de partículas sólo permiten 7.200 partículas sin que el computador utilizado se vea sobrepasado, por lo que simular con más partículas desde un comienzo no es posible. Por otro lado, el porcentaje de deposición -de partículas y másico- se mantiene para estas aproximaciones, ya que sólo se modifica la posición de impacto y no algún parámetro que modifique la velocidad crítica.

Finalmente, con las aproximaciones de los perfiles de deposición se obtienen resultados con mejor resolución y calidad para cada tobera con su alimentador.

4.11. Altura de la deposición

Dado que los perfiles de deposición se obtuvieron en base al volumen acumulado de las partículas, no es posible saber con esta información la altura de la deposición. La altura de deposición corresponde a la distancia entre el sustrato y el punto más alto del perfil de deposición generado para cada posición del sustrato.

El volumen obtenido en los perfiles de deposición corresponde al volumen generado por la profundidad del sustrato -2 mm-, el tamaño del paso del sustrato producto de su discretización -0,1

mm- y la altura que alcance el perfil de deposición. Por lo tanto, dividiendo por la profundidad y paso del sustrato se obtiene la altura de los perfiles de deposición.

Los resultados referentes a la altura de deposición se obtuvieron para la aproximación mencionada en la sección anterior, en donde se simula el proceso de *cold spray* durante 2 segundos.

Las alturas alcanzadas usualmente por la deposición de material utilizando el proceso de *cold spray* suele ser entre 100 μm y 400 μm .

5. Validación

Como se describió en la sección **4.2. Validación**, se obtienen los resultados de temperatura de impacto, velocidad de impacto y velocidad media de las partículas de aluminio, mediante simulación numérica. Los resultados son obtenidos en base a la investigación realizada por A. Sova y compañía, “*Deposition of aluminum powder by cold spray micronozzle*” [21].

Para obtener los resultados mencionados, se comienza construyendo la geometría axisimétrica y posterior mallado de ésta. La geometría de la tobera y zona de *free jet* (que corresponde a la región donde el gas es eyectado después de salir de la tobera) conforman el volumen de control, éste se puede observar en la Figura 5.1. Además, con respecto a las medidas indicadas en esta figura, se pueden apreciar en la Tabla 5.1.

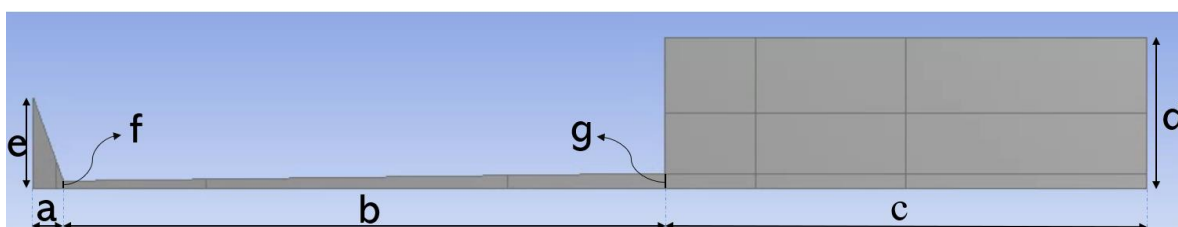


Figura 5.1. Geometría de la tobera convergente-divergente utilizada en simulación numérica.

Tabla 5.1. Valores referentes a las secciones indicadas en Figura 5.1.

Sección	Largo [mm]
a	1,00
b	20,00
c	16,00
d	5,00
e	3,00
f	0,25
g	0,50

Con respecto al mallado, éste es dividido en distintas secciones con la finalidad de lograr una mayor densidad de elementos en las zonas críticas, es decir, se utiliza un tamaño de elemento menor.

Las secciones del volumen de control se pueden apreciar en la Figura 5.2, además, en ésta se señalan la entrada del gas (“*inlet*”), salida del gas (“*outlet*”), paredes de la tobera (“*wall*”) y el eje axisimétrico (“*symmetry*”). El total de elementos con que cuenta el mallado es de 342.282 y se

utiliza la opción *All-Quad*, la cual obliga a que todos los elementos del mallado posean geometría con forma de cuadrilátero.

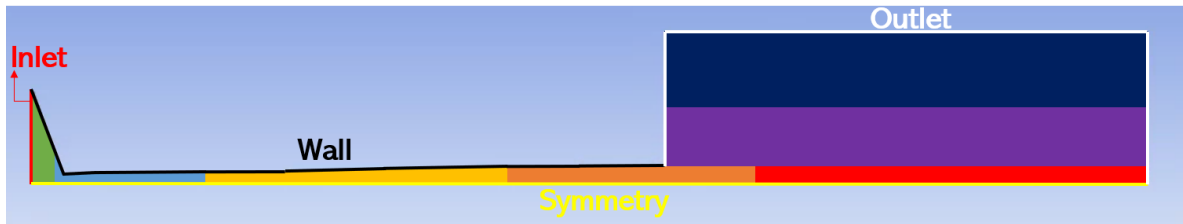


Figura 5.2. Secciones del volumen de control y sus condiciones de borde.

En la Tabla 5.2, se indican las medidas de los elementos para cada división del volumen de control.

Tabla 5.2. Nombre y tamaño de elemento de cada sección del volumen de control ilustrado en Figura 5.2.

Color	Sección	Tamaño de elemento [m]
	Zona convergente	$1,61 \cdot 10^{-5}$
	Garganta	$1,19 \cdot 10^{-5}$
	Zona divergente	$1,25 \cdot 10^{-5}$
	Salida tobera	$1,19 \cdot 10^{-5}$
	<i>Free jet</i> inferior	$1,90 \cdot 10^{-5}$
	<i>Free jet</i> medio	$3,30 \cdot 10^{-5}$
	<i>Free jet</i> superior	$3,50 \cdot 10^{-5}$

Al respecto de las condiciones termodinámicas iniciales, se utilizan las que se indican a continuación:

- $P_{inlet} = 5,00 \cdot 10^6$ [Pa]
- $P_{outlet} = 1,01 \cdot 10^5$ [Pa] (Presión ambiente)
- $T_{inlet} = 300$ [K] (Temperatura ambiente)
- $T_{outlet} = 300$ [K] (Temperatura ambiente)

Por último, en relación a la configuración previa a la simulación del gas, se define el *time step*, que corresponde a $1 \cdot 10^{-8}$ [s] y se utiliza un total de 18.000 *time steps*. Una vez definido todo lo anterior se procede a simular el gas, obteniéndose los perfiles de velocidad y temperatura, los cuales son comparados por los obtenidos en la investigación “*Deposition of aluminum powder by cold spray micronozzle*” [21] que, como se señaló, es la utilizada como referencia para validar el modelo a utilizar. La comparación señalada se muestra en la Figura 5.3 y Figura 5.4.

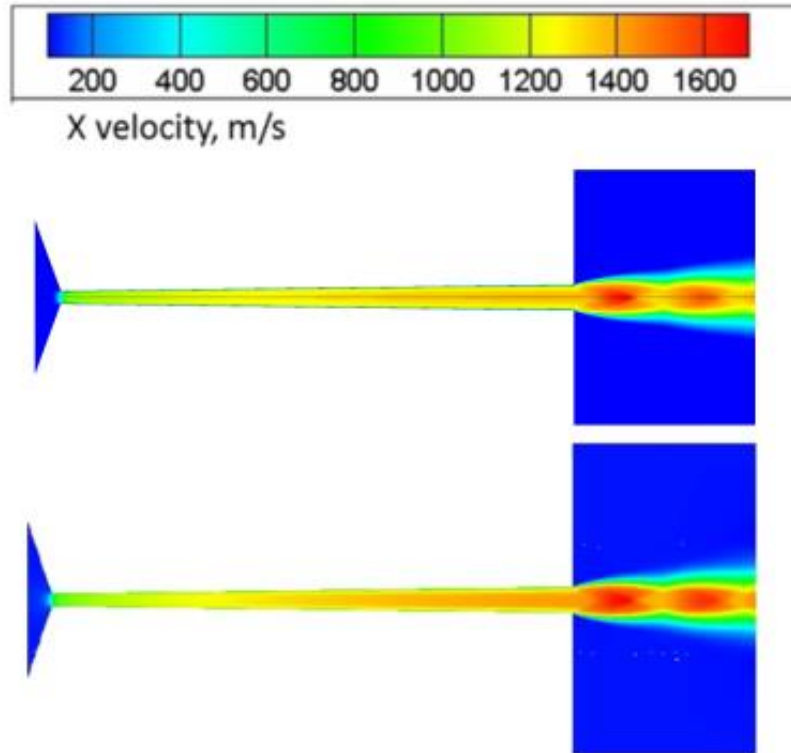


Figura 5.3. Perfiles de velocidad del gas. Resultados validación (arriba) y resultados A. Sova (abajo).

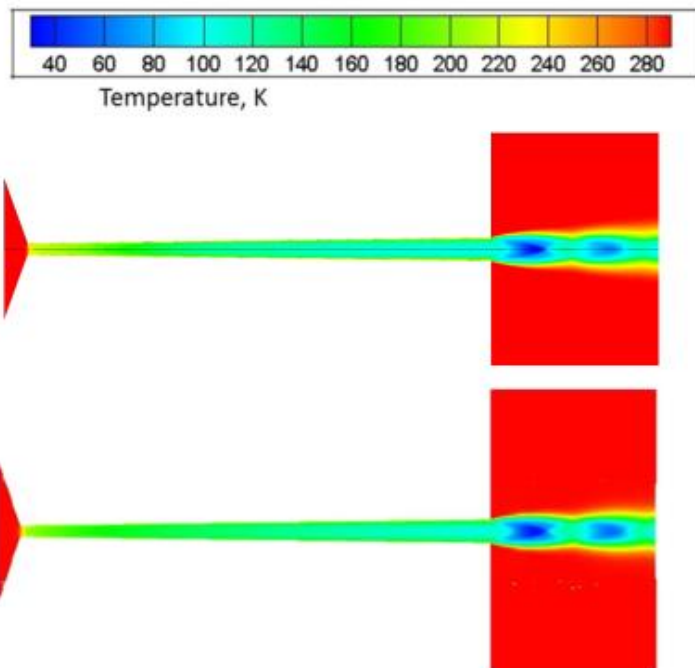


Figura 5.4. Perfiles de temperatura del gas. Resultados validación (arriba) y resultados A. Sova (abajo).

Como se puede apreciar en las Figura 5.3 y Figura 5.4, los perfiles de velocidad y temperatura son similares, por lo que se da por validado el flujo de gas.

Luego, se procede a añadir las partículas en el flujo de gas de helio. Se configura de manera tal que las partículas inicien su recorrido desde la zona de entrada del gas (“inlet”), específicamente desde un punto situado a $2 \cdot 10^{-5}$ m del eje axisimétrico -cabe mencionar que no se pueden inyectar las partículas desde el eje axisimétrico, ya que la velocidad en este eje es cero-. Se comienza inyectando partículas de 5 μm , luego de 10 μm , y así sucesivamente hasta llegar a las partículas de 45 μm . Dado que para obtener estos resultados se utiliza el modelo estocástico *Random Walk*, para cada partícula se realiza un total de 100 intentos, lo cual se traduce en un total de 100 partículas para cada diámetro.

En la Figura 5.5 se observa el recorrido de 100 partículas de 15 μm con su respectiva dispersión producto del modelo estocástico *Random Walk*.

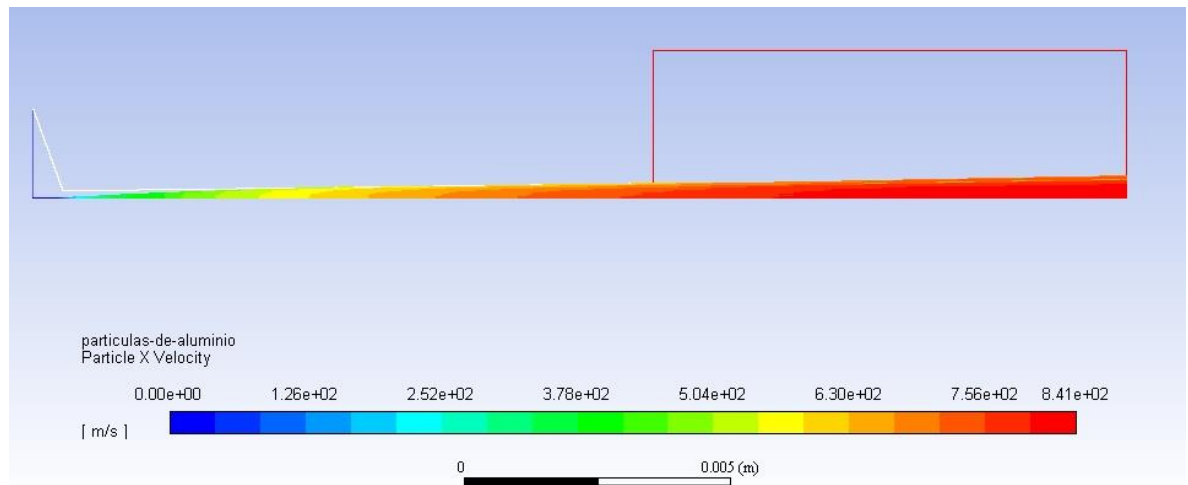


Figura 5.5. Trayectoria partículas de aluminio de 15 μm de diámetro, donde el color representa la velocidad horizontal de la partícula.

Como se señaló anteriormente, las mediciones experimentales mediante el método *PTV* realizadas por A. Sova para calcular la velocidad de las partículas, se realizaron en un tramo de 1 mm a 6 mm de la salida de la tobera. Es por este motivo, que se calcula la temperatura y velocidad de impacto de las partículas añadidas a 6 mm de la salida de la tobera.

Posterior a un post procesamiento de datos, específicamente de las temperaturas y velocidades de cada partícula. Se logra obtener la velocidad máxima, mínima y promedio para cada diámetro de partículas a 6 mm de la salida de la tobera. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 5.6 y Figura 5.7, donde además se comparan con los resultados obtenidos por A. Sova.

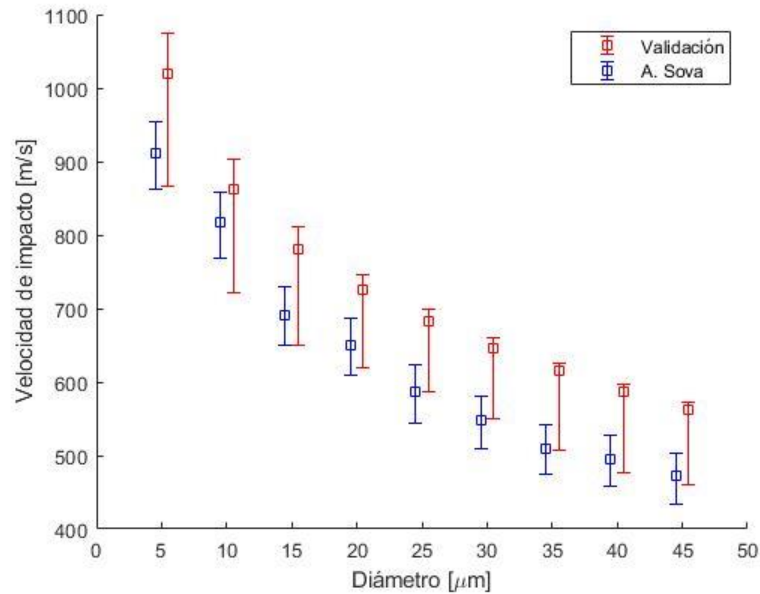


Figura 5.6. Comparación velocidad de impacto obtenidas mediante simulación numérica. En rojo resultados de la validación y en azul resultados obtenidos por A. Sova.

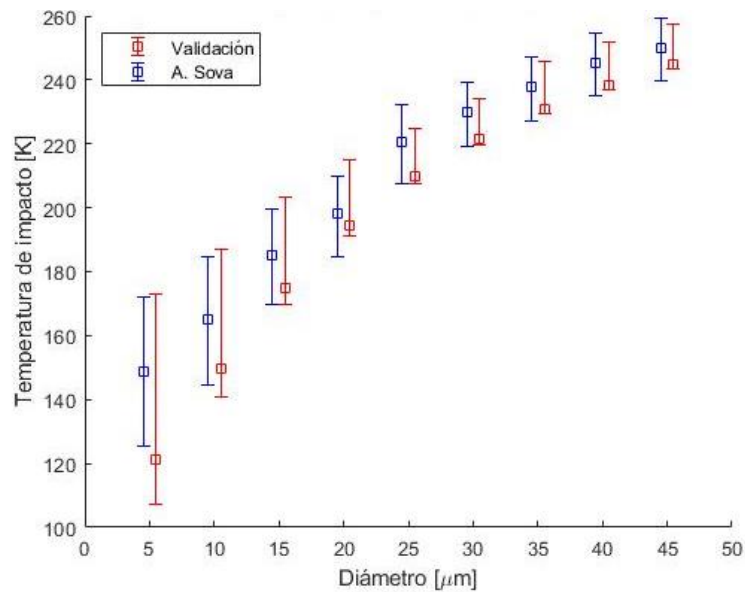


Figura 5.7. Comparación temperatura de impacto obtenidas mediante simulación numérica. En rojo resultados de la validación y en azul resultados obtenidos por A. Sova.

Como se observa en los resultados de las figuras (Figura 5.6 y Figura 5.7), los valores obtenidos en la validación se encuentran dentro de un rango aceptable en comparación con los obtenidos por A. Sova. Las diferencias que existen entre ambos resultados (validación y resultados de A. Sova) pueden deberse a diversos factores, como por ejemplo, en el artículo no se menciona desde qué punto se realiza la inyección de partículas y tampoco se señala a qué distancia de la salida de la tobera se realizan las mediciones.

Finalmente, mediante los mismos datos utilizados anteriormente, se obtiene la velocidad promedio de las partículas de diámetro 15 μm a 45 μm . Como se puede notar, las partículas de diámetro 5 μm y 10 μm no son consideradas este análisis, ya que como se señaló anteriormente, el método *PTV* no es capaz de detectar partículas de diámetro inferior a 10 μm . Por lo tanto, el resultado obtenido por A. Sova de manera experimental de la velocidad media (607 m/s) no considera las partículas de estos diámetros.

En la Figura 5.8 se muestra la distribución de velocidades presente en el total de partículas de diámetros entre 15 μm y 45 μm .

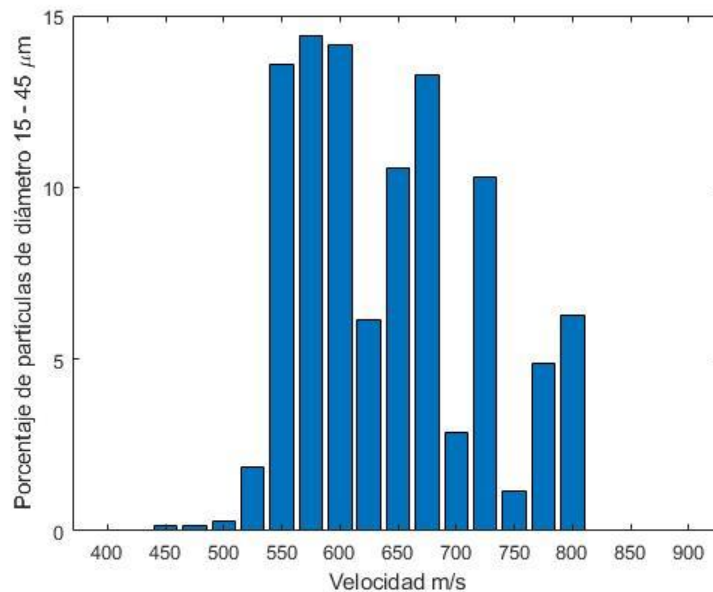


Figura 5.8. Distribución de velocidades para las partículas de diámetros entre 15 μm y 45 μm .

La distribución de velocidades de las partículas entrega una velocidad promedio de 656,90 m/s, este valor presenta un error de un 8,22% en comparación al resultado obtenido por A. Sova. En consecuencia, como este error es inferior a un 10%, se da por validado el modelo.

6. Resultados y Discusiones

6.1. Geometría del volumen de control

En base a las dimensiones de la tobera comercial, específicamente, en sus áreas transversales de garganta y salida se obtienen las medidas de la tobera plana a utilizar como modelo definitivo. La tobera plana, por tanto, posee las mismas áreas transversales que la tobera comercial presentada en la sección **4.3.1. Geometría del volumen de control**.

Antes de mostrar las dimensiones correspondientes a la tobera plana, se debe tener en consideración que la geometría de las secciones transversales de ésta corresponde a un acho constante de 2 mm.

En la Figura 6.1 se observa el modelo de volumen de control definitivo a utilizar con sus medidas respectivas indicadas con letras, las cuales detallan las secciones de interés. Estos valores se indican en la Tabla 6.1.

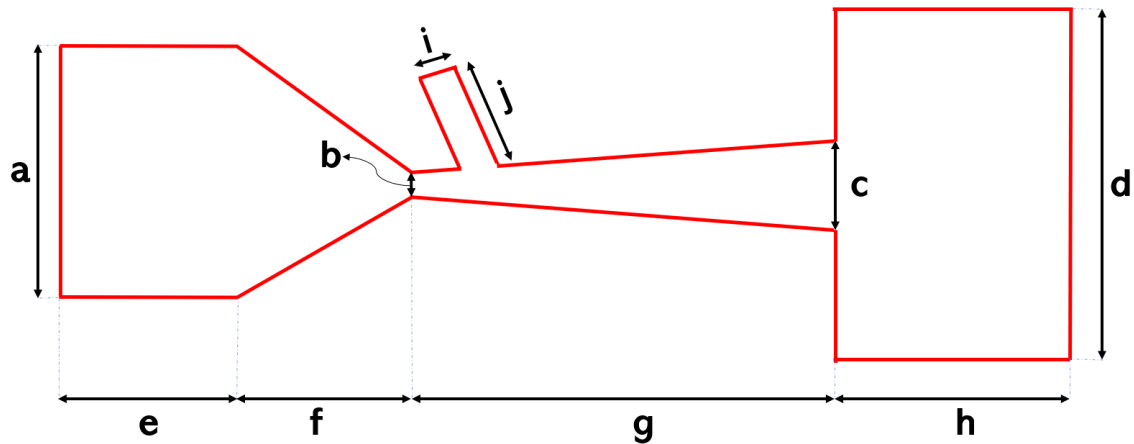


Figura 6.1. Volumen de control definitivo con sus medidas correspondientes.

Tabla 6.1. Detalle de los valores indicados en Figura 6.1.

Sección	Largo [mm]
a	35,00
b	2,00
c	16,00
d	60,00
e	20,00
f	20,00
g	130,00
h	100,00
i	3,13 (1/8')
j	19,05 (3/4')

6.2. Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se utilizan 4 mallados distintos, éstos son simulados bajo las mismas condiciones iniciales. Los resultados obtenidos son analizados y se calcula la velocidad máxima del gas para cada mallado.

En la Tabla 6.2 se muestran los mallados utilizados con sus respectivos números de elementos y error porcentual con respecto al mallado más fino.

Además, en la Figura 6.2 se puede observar la curva de la velocidad máxima del gas en función del número de elementos.

Tabla 6.2. Número de elementos y velocidad máxima del gas de cada mallado. También el error con respecto al mallado más fino.

Mallado	Número de elementos	Velocidad máxima del gas [m/s]	Error [%]
1	156.216	951,18	3,36
2	307.004	969,19	1,53
3	451.335	980,25	0,41
4	514.770	984,25	—

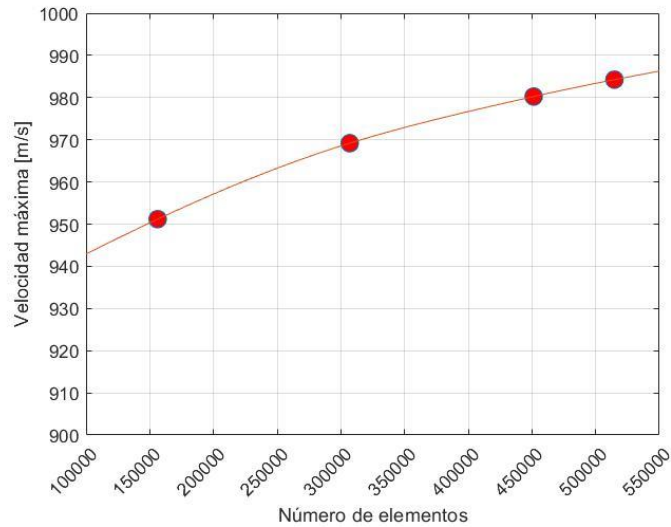


Figura 6.2. Curva de velocidad máxima del gas en función del número de elementos.

El mallado seleccionado corresponde al mallado 1, el cual posee 156.216 elementos y un error del 3,36% con respecto al mallado de referencia -mallado más fino-. La selección se basa en el hecho de que el error que entrega este mallado es bajo y, además, se puede observar en la Figura 6.2 que el aumento de la velocidad a medida que aumenta el número de elementos es cada vez más leve, por lo que un aumento significativo en la cantidad de elementos no generará un gran cambio en los resultados de la simulación. Por otro lado, y no menos importante, se debe tener en consideración que el tiempo de simulación se encuentra completamente ligado con el número de elementos, por lo que por una razón de limitación de tiempo y técnico se considera el mallado 1 el más rápido de simular. Por lo tanto, por motivos de precisión y de tiempo de simulación, la cantidad de elementos del mallado 1 (156.216 elementos) es la más apta para las simulaciones finales.

6.3. Ubicación horizontal del alimentador

En base a los resultados del gas simulado en la tobera sin alimentador que se puede observar en la Figura 6.3, se obtienen los resultados de las partículas añadidas en este flujo, específicamente, la trayectoria de cada una de las partículas. Por otro lado, en esta figura se observa cómo actúa la configuración *injection type: group* descrita en la sección de metodología para un total de 400 partículas, que es la cantidad de partículas utilizadas para este análisis, ya que se utilizan 40 divisiones entre el punto inicial y final (*Number of streams*) y 10 intentos para cada uno de estos puntos (*Number of tries*), que relaciona el efecto turbulento.

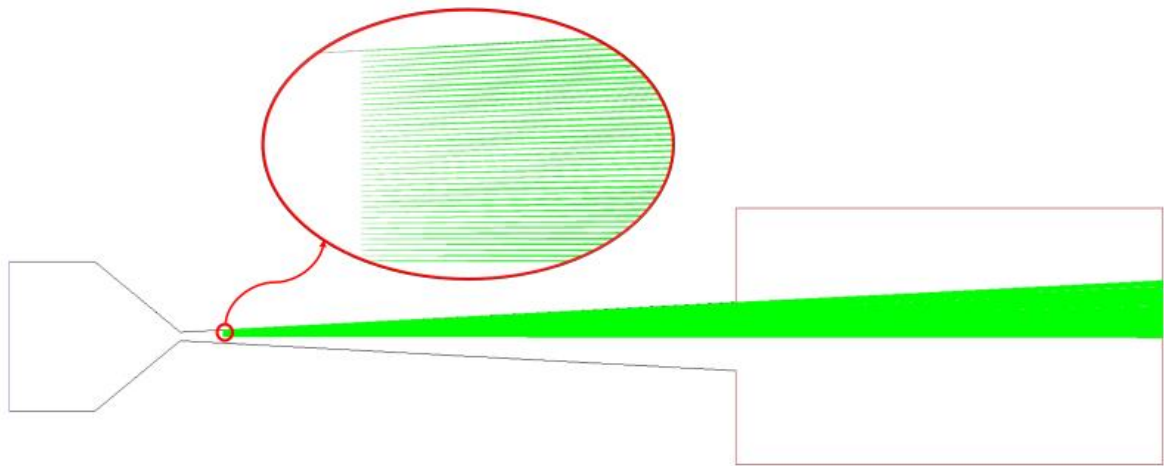


Figura 6.3. Diseño tobera sin alimentador y zona de free jet para configuración "injection type: group" con un total de 400 partículas. Las curvas verdes corresponden a la trayectoria de las partículas.

En la Figura 6.4 se pueden observar los resultados de las velocidades máximas, mínimas y promedio -representada con una "x"- para cada diámetro y posición, además de la velocidad crítica promedio para cada posición, representada con una circunferencia. Por otro lado, en la Tabla 6.3 se detallan los porcentajes de deposición que presenta cada configuración y la deposición promedio ponderada para cada posición, es decir, se pondera la masa que proporciona cada partícula para la obtención del promedio.

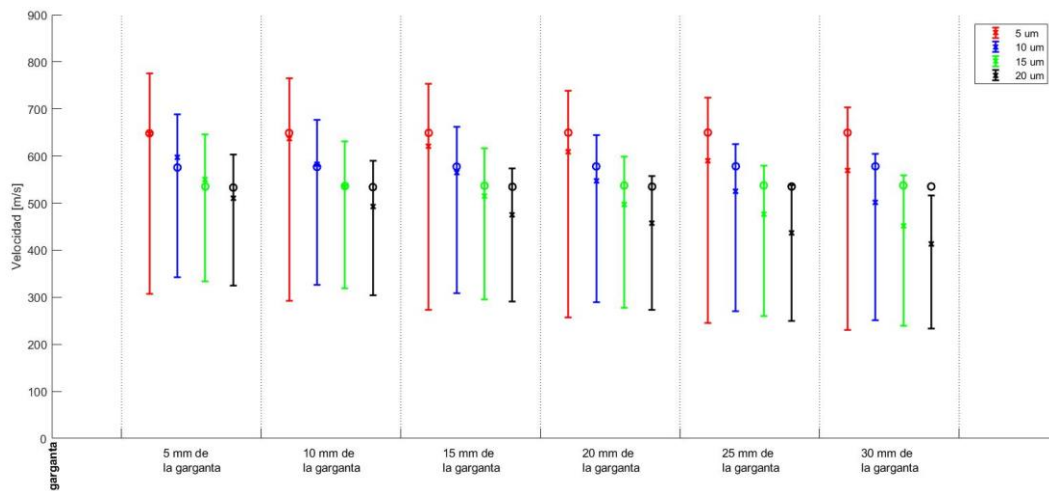


Figura 6.4. Velocidad máxima, mínima y promedio para cada diámetro de partícula y posición de inyección con su respectiva velocidad crítica promedio para el conjunto de partículas.

Tabla 6.3. Porcentajes de deposición de partículas para cada diámetro de partículas y posición de inyección.

Diámetro	Porcentaje de deposición de masa					
	Distancia de la garganta [mm]					
	5	10	15	20	25	30
5 μm	71,8 %	65,8 %	60,2 %	58,3 %	56,1 %	53,5 %
10 μm	69,4 %	63,8 %	61,6 %	57,0 %	54,8 %	49,5 %
15 μm	65,6 %	59,5 %	55,6 %	50,5 %	38,5 %	26,8 %
20 μm	53,2 %	49,3 %	31,3 %	23,3 %	5,1 %	0 %
Promedio ponderado	58,3 %	53,4 %	40,6 %	33,7%	18,6 %	11,7 %

Posterior a los resultados obtenidos y presentados, se puede apreciar que a medida que la ubicación del alimentador se aleja de la garganta, se obtiene una menor deposición y velocidades - esto ocurre para cada diámetro-. Esto se debe principalmente al hecho de que las partículas al ser inyectadas más cerca de la garganta poseen más distancia para recorrer, por lo que el gas es capaz de acelerar las partículas por más tiempo, obteniéndose velocidades mayores y, por lo tanto, mayor deposición.

Asimismo, se puede observar que para menores diámetros, las velocidades y porcentajes de deposición son mayores. Esto concuerda con lo esperado, ya que como se señala en la investigación de Schmidt [26], las partículas de menor diámetro aceleran más por su baja inercia y, en consecuencia, alcanzan velocidades mayores, sin embargo, las partículas de menor tamaño poseen una inercia térmica baja, por lo cual se enfrían y llegan a temperaturas menores que partículas de mayor masa, siendo esto último una desventaja para estas partículas.

Además, observando los porcentajes de deposición promedio de la Tabla 6.3, se observa una deposición considerable y satisfactoria, en lo que respecta el rango de diámetro de partícula utilizado, para la posición a 5 mm de la garganta, 65,0 %.

Por lo tanto, como el porcentaje de deposición es el parámetro principal en el proceso de *Cold Spray* y así también, la velocidad, se escoge la posición más cercana a la garganta, es decir, a 5 [mm] de ésta (45 [mm] posición en el eje x). Con esta posición se garantizan las mayores velocidades y deposiciones con respecto a las otras ubicaciones candidatas.

6.4. Alimentadores

Posterior a la simulación de la tobera sin alimentador, se obtiene la presión del gas en la pared a una distancia de 5 mm de la garganta (como se determinó en la sección **6.3. Ubicación horizontal del alimentador**). Esta presión corresponde a 358.716 Pa, por tanto, más la sobre presión de 10 psi (68.947 Pa) que se añade para garantizar la inyección del polvo metálico, se obtiene la presión a la cual funcionará el alimentador externo. La presión en el alimentador es de 454.663 Pa \approx 460.000 Pa.

Con respecto a la geometría de las toberas con alimentadores, como se indicó en la sección **4.7. Alimentadores**, se utilizan 3 diferentes configuraciones, las cuales difieren en su ángulo de inclinación, siendo éstos 45°, 90° y 135°, las geometrías realizadas se presentan en las siguientes figuras (Figura 6.5, Figura 6.6 y Figura 6.7).

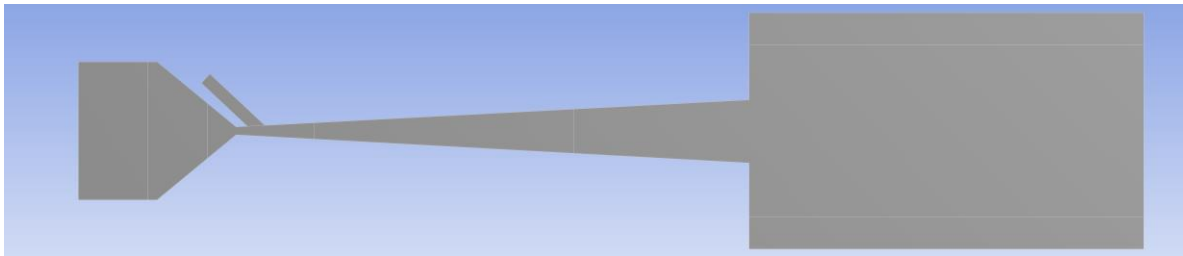


Figura 6.5. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 45°.

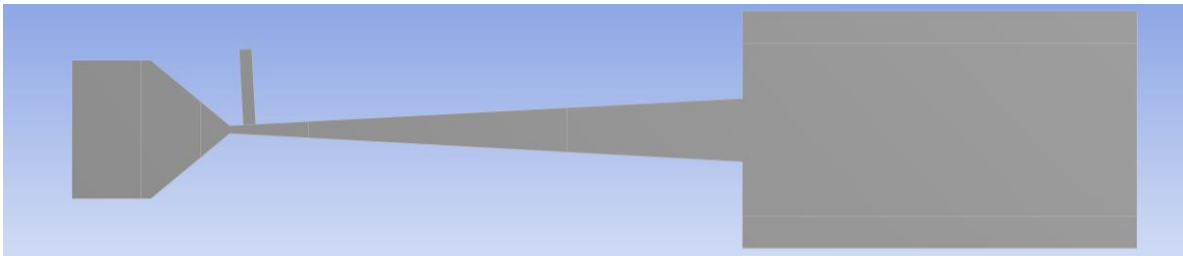


Figura 6.6. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 90°.

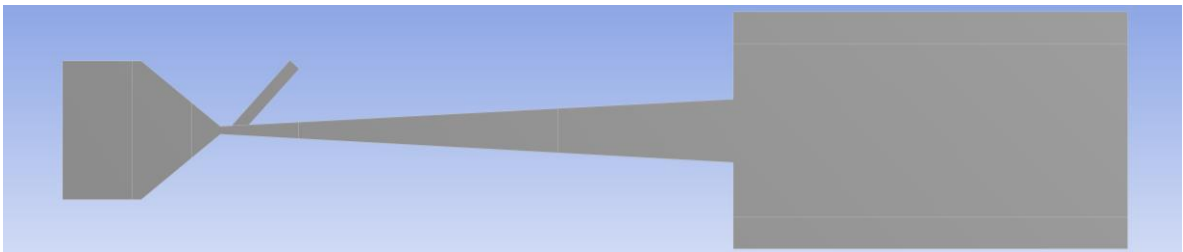


Figura 6.7. Diseño de tobera con alimentador. Ángulo de inclinación del alimentador de 135°.

Estos alimentadores corresponden los utilizados para las simulaciones finales, en los cuales se simula el gas bajo las condiciones conocidas y luego se añaden las partículas para obtener los perfiles de deposición que se generan en cada configuración.

6.5. Mallado volumen de control con alimentador

Dado que ya se cuenta con la geometría del volumen de control definitivo a utilizar, el cual se encuentra debidamente fraccionado para obtener las secciones de mallado, se procede a realizar el mallado.

Por consiguiente, se define el tamaño de elemento para cada sección, de manera tal que el mallado completo posea aproximadamente 156.000 elementos (ver **6.2. Análisis de sensibilidad**) y que las secciones de mallado posean fineza de mallado distinta para cada una de éstas (ver **4.3.2. Mallado del volumen de control**).

En la Figura 6.8 se pueden observar las secciones de mallado realizadas, con sus respectivos elementos de distintos tamaños, para una tobera con alimentador en 90° . El mallado para los volúmenes de control con distinto ángulo de inclinación (45° y 135°) es análogo al presentado, por consiguiente, lo son así también el tamaño de elemento utilizado para cada sección de mallado. Este mallado, por tanto, es el mallado definitivo para el volumen de control. Además se recuerdan las secciones de mallado para el volumen de control previamente presentado (Figura 4.10). Luego, en la Tabla 6.4 se detalla el tamaño de elemento para cada una de estas secciones del volumen de control.

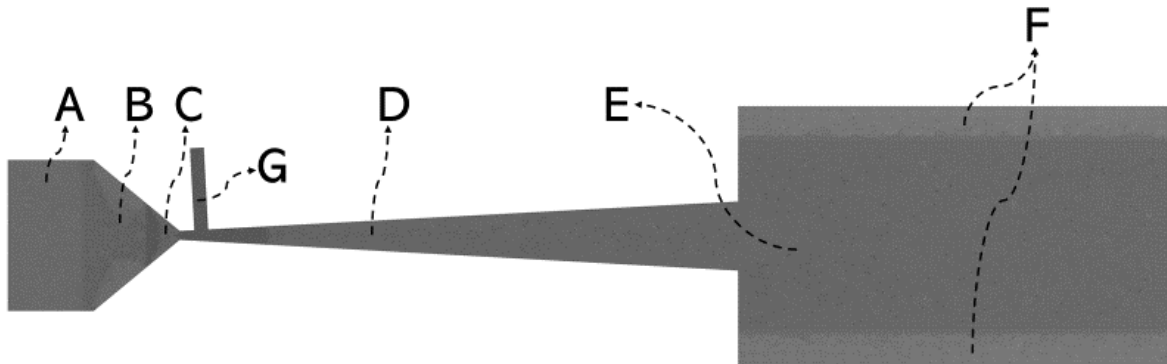


Figura 6.8. Secciones de mallado para volumen de control.

Tabla 6.4. Detalle del tamaño de elemento para cada sección de mallado.

Sección	Tamaño de elemento [m]
A	$2,5 \cdot 10^{-4}$
B	$2,1 \cdot 10^{-4}$
C	$1,5 \cdot 10^{-4}$
D	$1,9 \cdot 10^{-4}$
E	$2,0 \cdot 10^{-4}$
F	$3,0 \cdot 10^{-4}$
G	$1,6 \cdot 10^{-4}$

6.6. Contornos flujo de gas

Una vez que el gas ha sido simulado en el interior de la tobera, es posible obtener la distribución de temperatura y velocidad de éste. Estas distribuciones se conocen por el nombre de “contornos” del inglés “*contour*”, que es la opción que se utiliza en ANSYS para obtener estas figuras.

Por consiguiente, en esta sección se presentan los contornos de la velocidad absoluta y temperatura para cada tobera con su respectivo alimentador, en donde además se muestran estos contornos para la zona de intersección entre la entrada del alimentador con la entrada de la tobera, es decir, en la zona por donde hacen ingreso las partículas hacia la tobera.

6.6.1. Tobera con alimentador de 45°

En la Figura 6.9 el contorno de velocidad absoluta del volumen de control y en la Figura 6.10 el contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador. Asimismo, en la Figura 6.11 el contorno de la temperatura del volumen de control y en la Figura 6.12 el contorno de temperatura en la zona del alimentador. Los resultados corresponden a los entregados por la tobera con un alimentador que posee ángulo de inclinación igual a 45°.

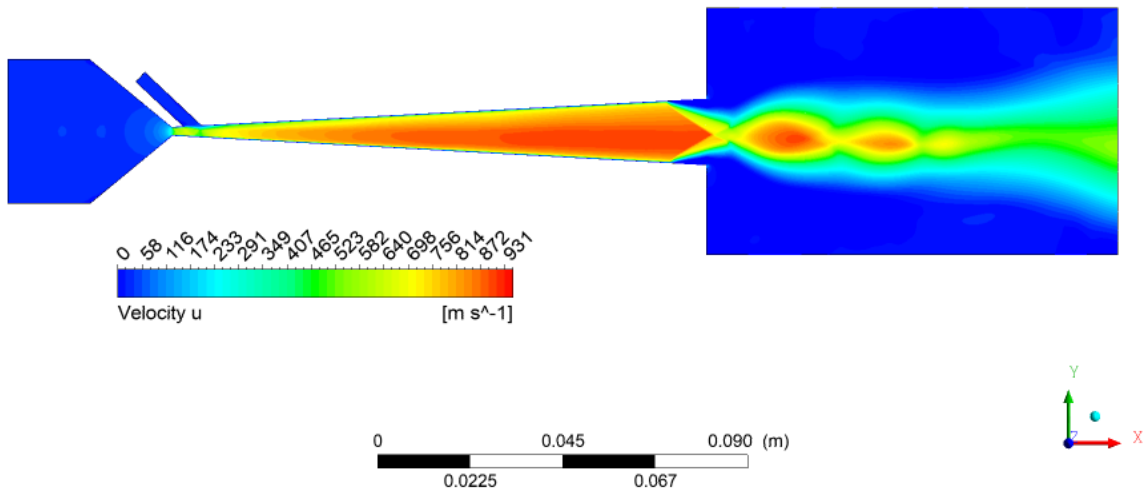


Figura 6.9. Contorno de velocidad absoluta del volumen de control para tobera con alimentador de 45°.

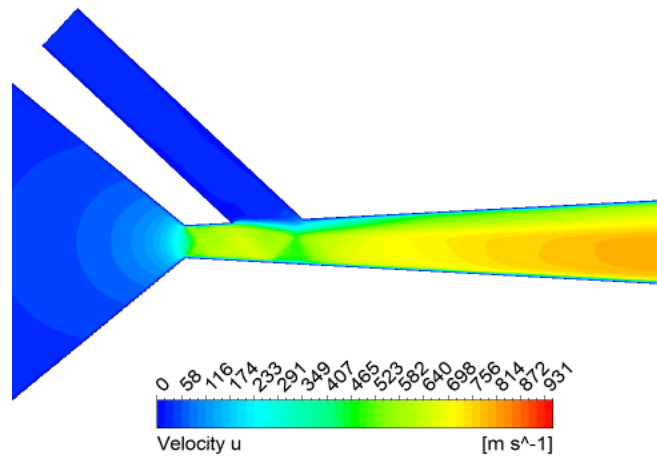


Figura 6.10. Contorno de velocidad absoluta en zona de alimentador para tobera con alimentador de 45°.

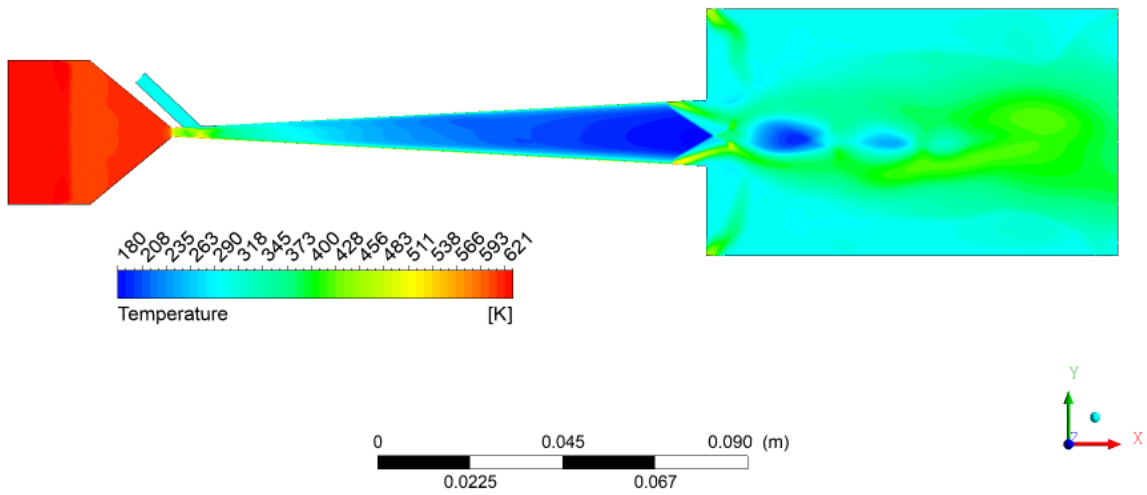


Figura 6.11. Contorno de temperatura del volumen de control para tobera con alimentador de 45°

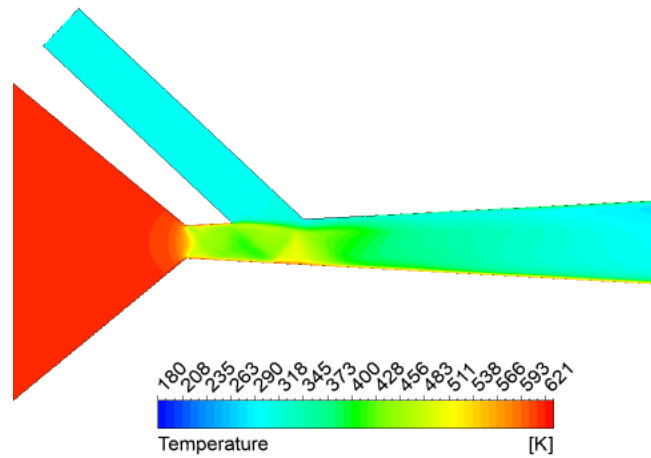


Figura 6.12. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 45°.

6.6.2. Tobera con alimentador de 90°

En la Figura 6.13 el contorno de velocidad absoluta del volumen de control y en la Figura 6.14 el contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador. Asimismo, en la Figura 6.15 el contorno de la temperatura del volumen de control y en la Figura 6.16 el contorno de temperatura en la zona del alimentador. Los resultados corresponden a los entregados por la tobera con un alimentador que posee ángulo de inclinación igual a 90°.

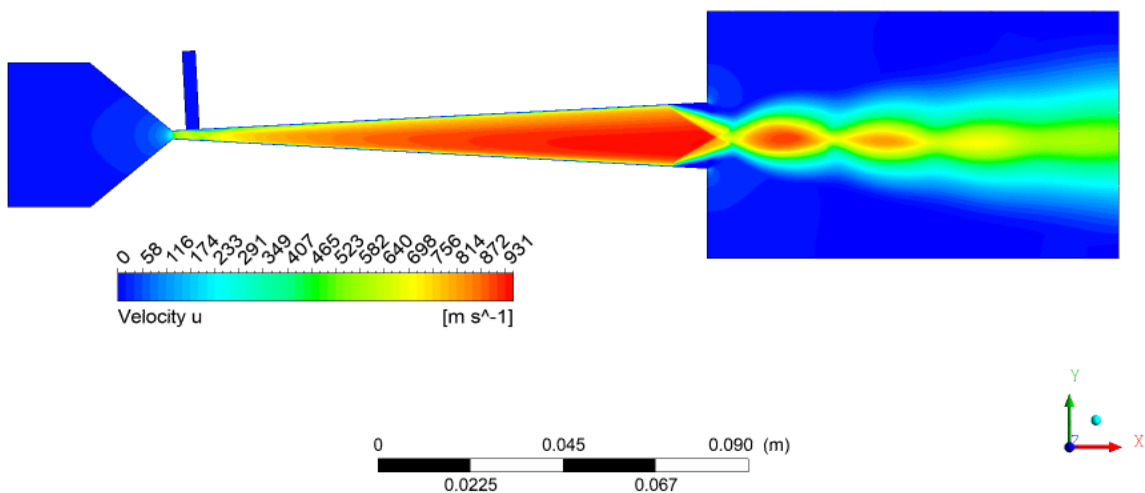


Figura 6.13. Contorno de velocidad absoluta del volumen de control para tobera con alimentador de 90°.

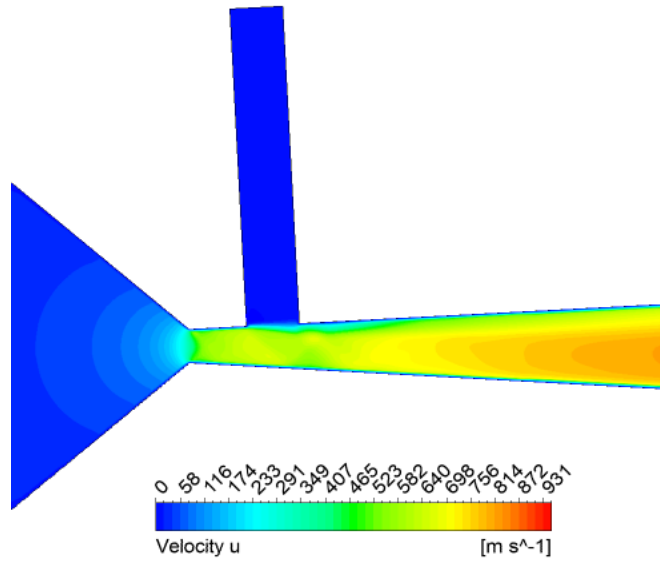


Figura 6.14. Contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador para tobera con alimentador de 90°.

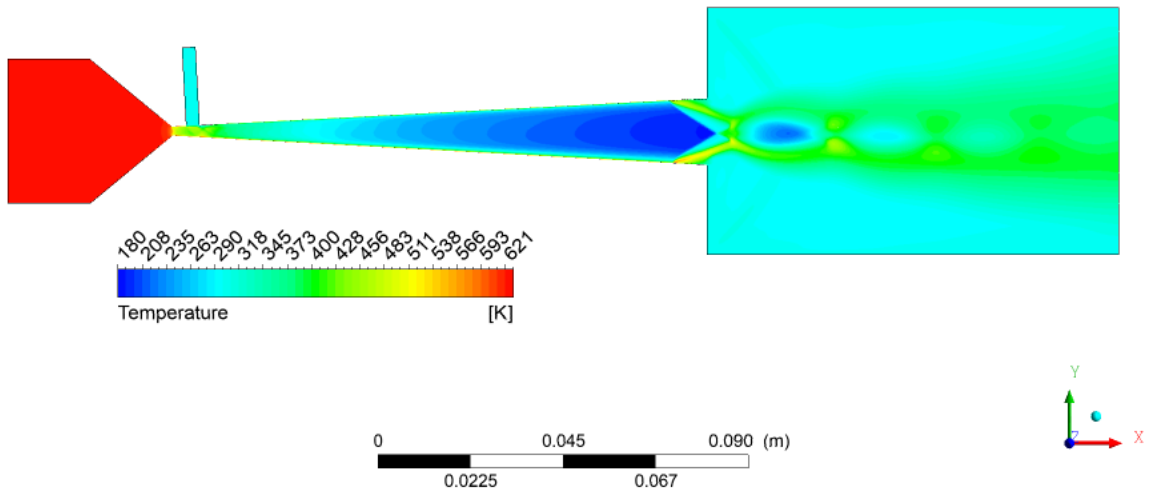


Figura 6.15. Contorno de temperatura para tobera con alimentador de 90°.

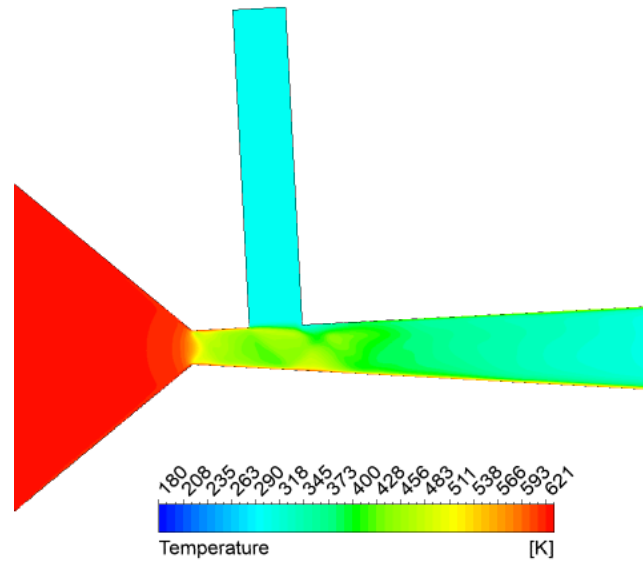


Figura 6.16. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 90°.

6.6.3. Tobera con alimentador de 135°

En la Figura 6.17 el contorno de velocidad absoluta del volumen de control y en la Figura 6.18 el contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador. Asimismo, en la Figura 6.19 el contorno de la temperatura del volumen de control y en la Figura 6.20 el contorno de temperatura en la zona del alimentador. Los resultados corresponden a los entregados por la tobera con un alimentador que posee ángulo de inclinación igual a 135°.

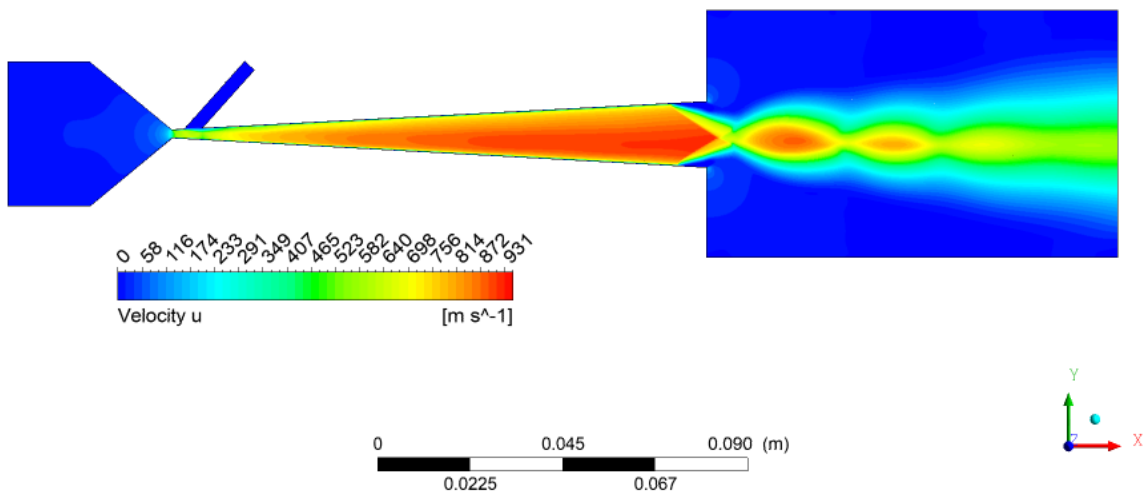


Figura 6.17. Contorno de velocidad absoluta para tobera con alimentador de 135°.

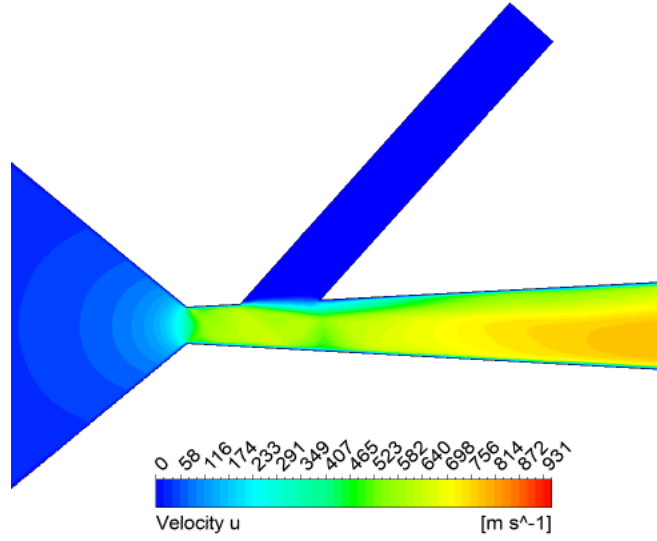


Figura 6.18. Contorno de velocidad absoluta en la zona del alimentador para tobera con alimentador de 135°.

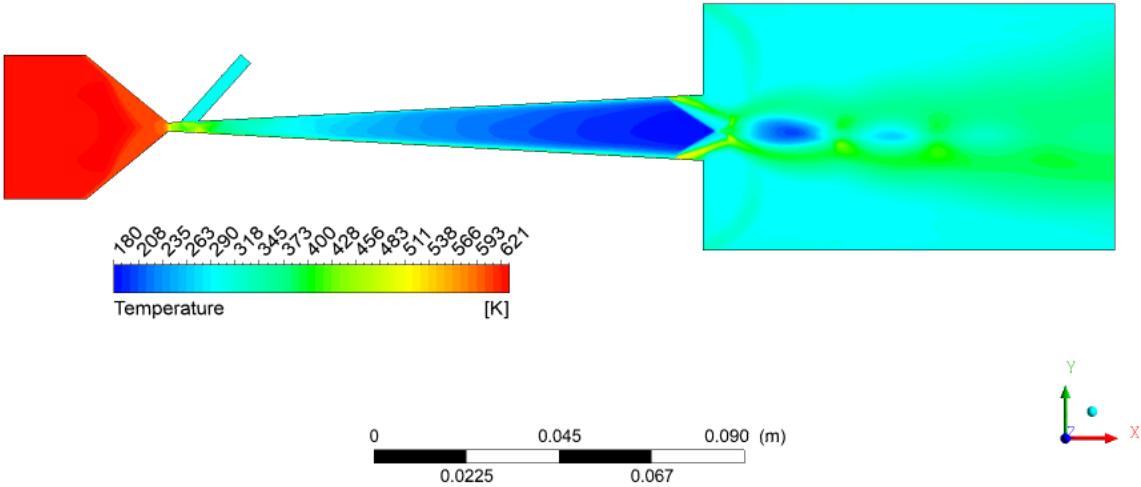


Figura 6.19. Contorno de temperatura para tobera con alimentador de 135°.

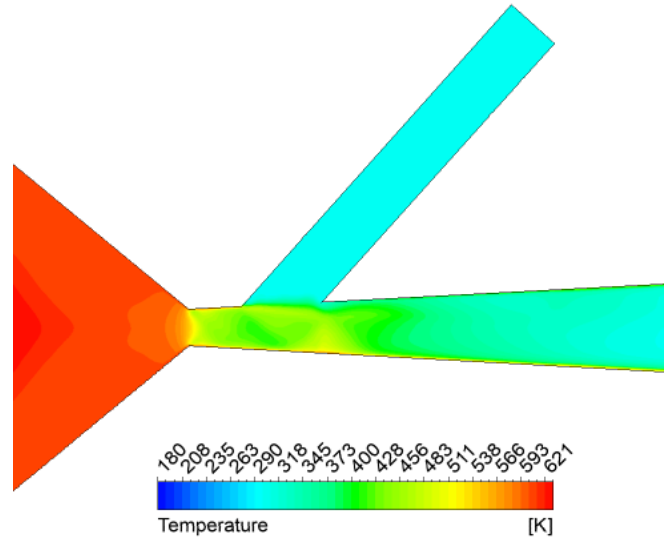


Figura 6.20. Contorno de temperatura en la zona de alimentador para tobera con alimentador de 135°.

A partir de las figuras de los contornos de velocidad y temperatura, se puede observar el comportamiento del gas al interior y salida de la tobera. Para el caso de la velocidad, se observa cómo éste se acelera posterior a la garganta, alcanzando velocidades máximas en la zona divergente y en el centro del *jet* a la salida. Por otro lado, con respecto a la temperatura, se observa cómo ésta decae posterior a la garganta, que es donde se genera la expansión del gas. Generándose zonas de menor temperatura dónde la expansión es mayor y, por lo tanto, la velocidad es mayor.

En el capítulo **5. Validación**, se obtuvieron los contornos de velocidad y temperatura para la validación del modelo realizada en esta investigación, donde se utiliza una tobera simétrica, es decir, sin alimentador. Si se comparan ambos resultados -los del capítulo de validación y los recién presentados- se puede observar una leve desviación vertical de los contornos en la salida de la tobera. Además de las diferencias que se generan en la zona entre la tobera y el alimentador, que es una zona de turbulencias producto de la intersección de los dos ingresos y choques del gas con la pared.

6.7. Variación velocidad y temperatura de partículas durante trayecto

Posterior a la inyección de partículas, mediante los resultados es posible obtener gráficos de la temperatura y velocidad horizontal de un grupo de éstas a medida que avanzan. De esta forma se identifica el comportamiento de las partículas durante su trayecto en la tobera, además de poder observar la influencia del diámetro con respecto a estos parámetros.

Los resultados presentados a continuación se obtienen desde un punto de inyección similar para cada tobera, por lo cual los valores de las velocidades y temperatura corresponden sólo a los valores

entregados por este punto de inyección, es decir, no considera los valores de toda la muestra de 7.200 partículas. Sin embargo, el análisis del comportamiento de las partículas utilizadas no pierde generalidad, ya que el comportamiento es idéntico para distintos puntos de inyección, en donde cambian los valores máximos y mínimos para estos parámetros de análisis.

Es así como en la presente sección se muestran los gráficos señalados, en donde X_t corresponde a la posición de la garganta, X_e a la salida de la tobera y X_s a la posición del sustrato.

6.7.1. Velocidad horizontal

En las siguientes figuras (Figura 6.21, Figura 6.22, Figura 6.23) se presentan los gráficos referentes a la velocidad horizontal de las partículas para distintos diámetros desde que son inyectadas para la tobera con alimentador de 45° , 90° y 135° respectivamente.

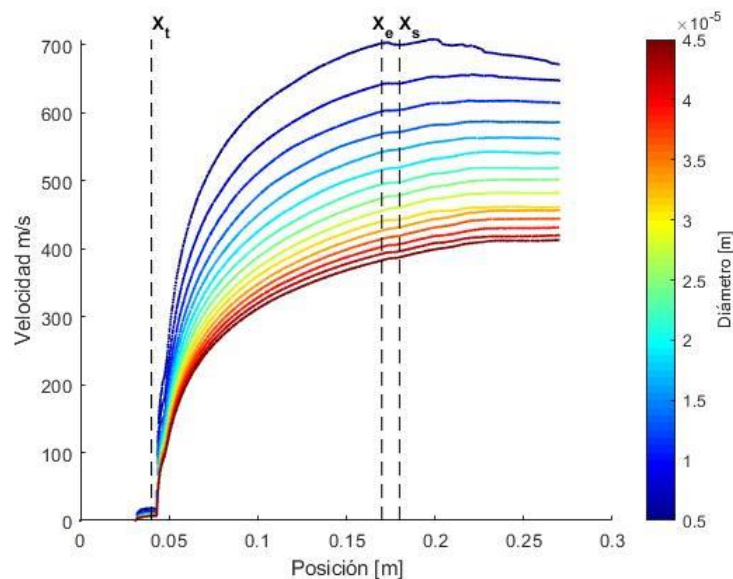


Figura 6.21. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 45° .

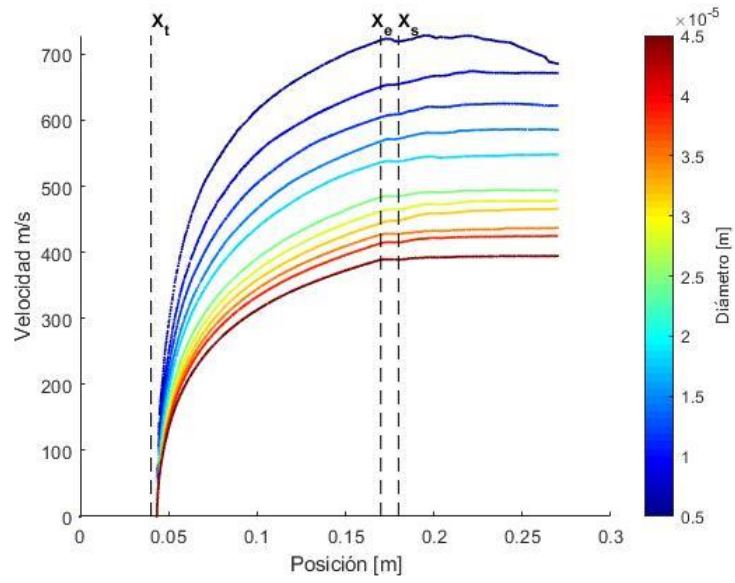


Figura 6.22. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 90°.

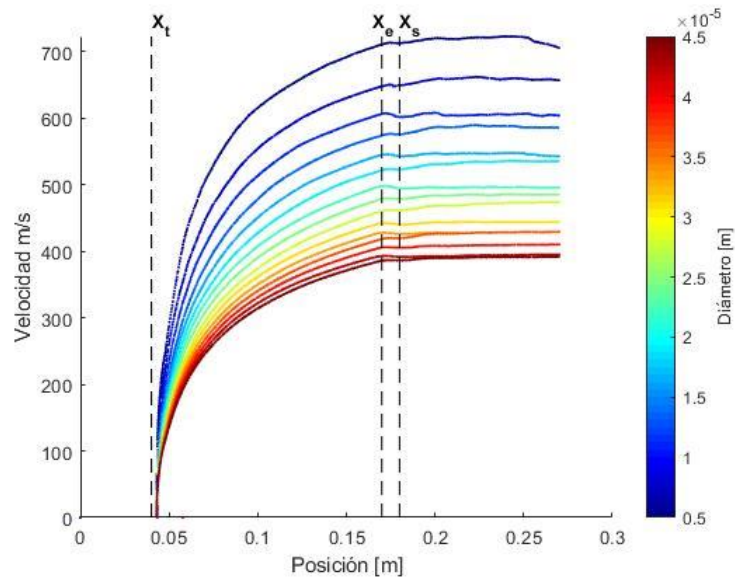


Figura 6.23. Velocidad de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 135°.

6.7.2. Temperatura

En las siguientes figuras (Figura 6.24, Figura 6.25, Figura 6.26) se presentan los gráficos referentes a la temperatura de las partículas para distintos diámetros desde que son inyectadas para la tobera con alimentador de 45° , 90° y 135° respectivamente.

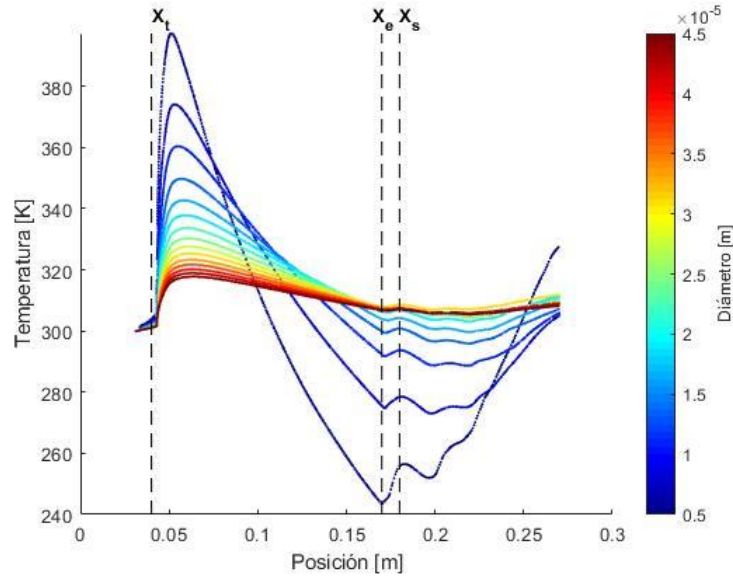


Figura 6.24. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 45° .

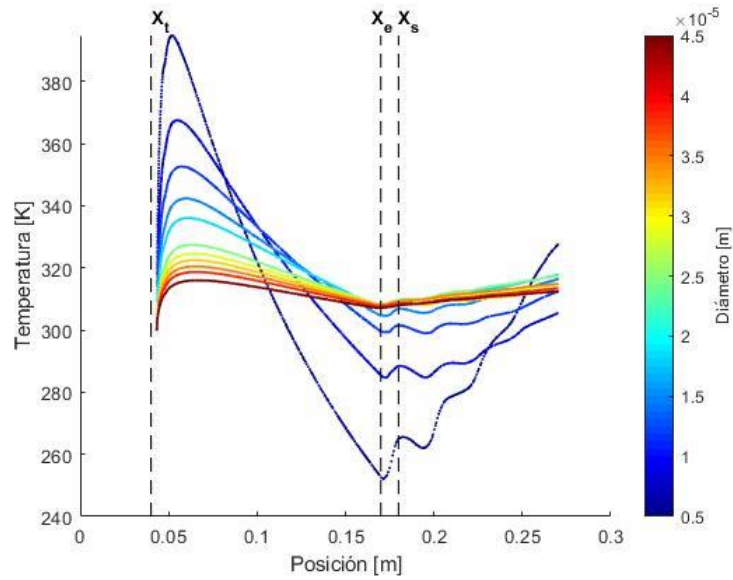


Figura 6.25. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 90° .

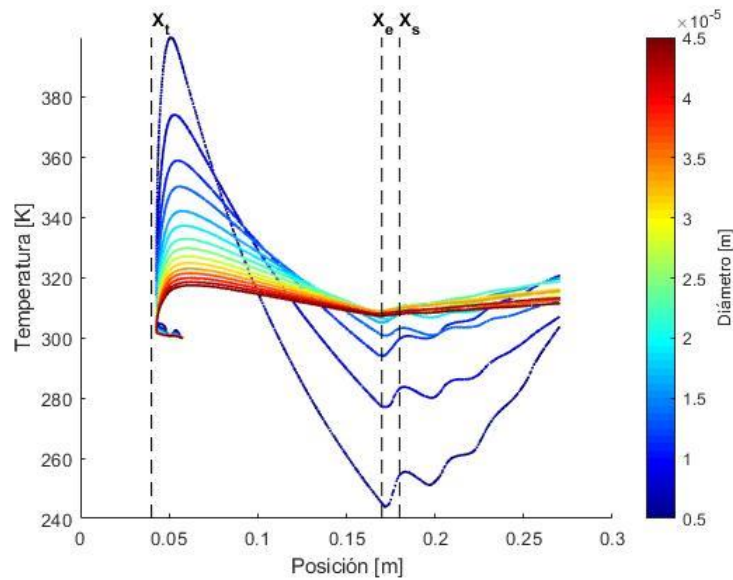


Figura 6.26. Temperatura de las partículas en función del diámetro y posición para tobera con alimentador de 135°.

En las figuras previamente presentadas se observa el comportamiento esperado para las partículas [26]. Éste es que las partículas de menor tamaño se calientan más rápido en el contacto inicial con el gas, alcanzando los valores máximos, sin embargo, asimismo se enfrían más rápido, incluso estas partículas adquieren una temperatura menor a la de inicio -temperatura ambiente, 300 K- antes de salir de la tobera. Las partículas de mayor tamaño presentan una variación de temperatura ínfima en comparación a las partículas de menor tamaño. Por otro lado, con respecto a la velocidad, las partículas más pequeñas alcanzan las velocidades más altas durante todo el trayecto, manteniéndose ésta posterior a la salida. Esto se debe a la baja inercia que poseen, por lo que el gas es capaz de entregarle energía cinética de manera más eficaz a estas partículas.

Para obtener una mejor eficiencia de deposición se requiere de una mayor velocidad de impacto (velocidad en la posición X_s) y una mayor temperatura de impacto -ya que la velocidad crítica disminuye si ésta aumenta según la ecuación (2.1)-. Por lo tanto, observando los resultados puede ser que la posición del sustrato no es la óptima, ya que se podría ubicar en una posición donde la velocidad de las partículas sea mayor, en la posición actual posee partículas pequeñas a baja temperatura que luego de 70 mm aproximadamente adquieren una temperatura mayor, sin embargo, este análisis no se debe considerar, ya que las simulaciones realizadas al gas no consideran interacción del gas con el ambiente, por lo que las partículas se frenan y equilibran su temperatura al interactuar con el ambiente.

6.8. Perfiles de deposición

Posterior a la simulación del gas en cada volumen de control y procesamiento de los datos de las partículas, se obtienen los perfiles de deposición que se generan en el sustrato ubicado a 10 mm de la salida de la tobera.

En esta sección se presentan los perfiles de deposición obtenidos para las toberas con alimentador de 45°, 90° y 135°. Primero se presentarán los perfiles de deposición que se generan producto del impacto de todas las partículas (7.200 partículas posee cada inyección) y luego se presentarán los perfiles de deposición que se generan considerando el criterio de adhesión, que es la velocidad crítica. Para cada uno de estos casos se obtiene también la comparación de los perfiles de deposición para cada alimentador.

Asimismo, se detallan los porcentajes de deposición -máscico y de partículas- para cada uno de los casos con criterio de adhesión. Finalmente, se presenta una comparación entre los perfiles de deposición considerando criterio de adhesión y sin considerar criterio de adhesión.

Antes de presentar los perfiles de deposición, se ilustra la trayectoria de las partículas para cada arreglo de alimentación. Por consiguiente, en las siguientes figuras (Figura 6.27, Figura 6.28 y Figura 6.29) se presentan las trayectorias de las 7.200 partículas, donde es posible observar la zona de impacto de las partículas con el sustrato que se encuentra a 10 mm de la salida de la tobera.

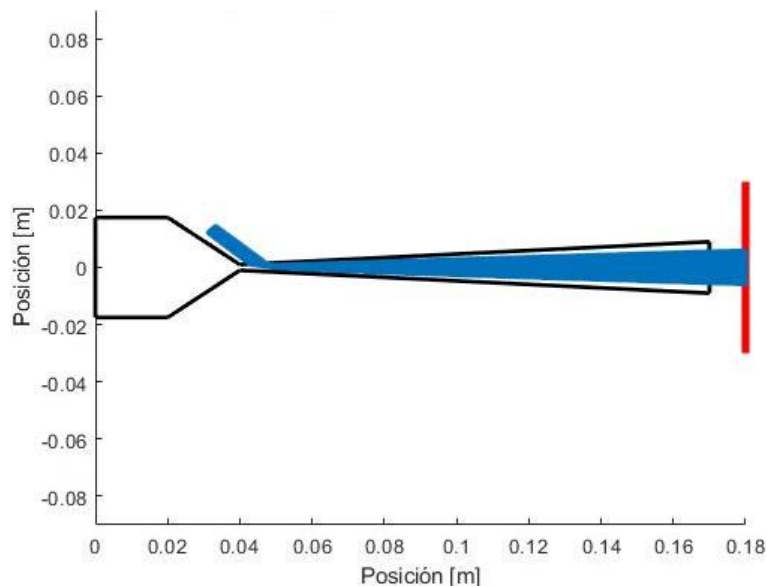


Figura 6.27. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 45°.

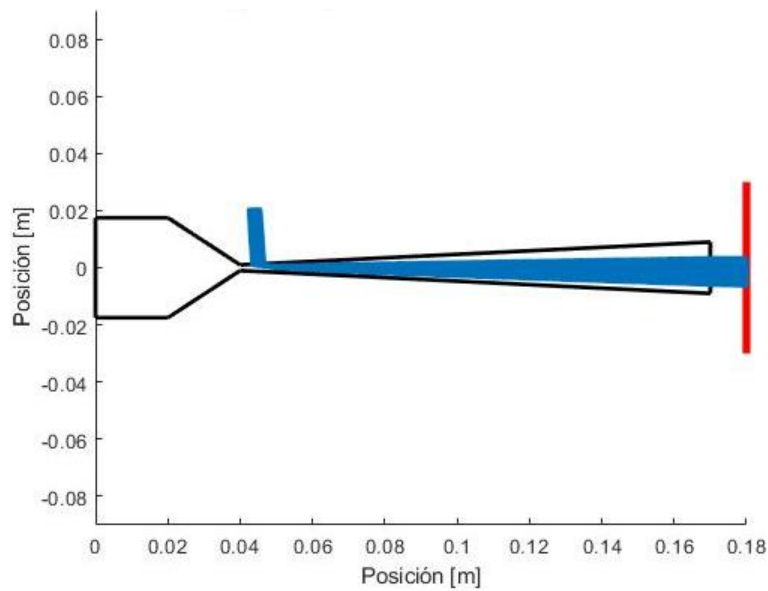


Figura 6.28. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 90°.

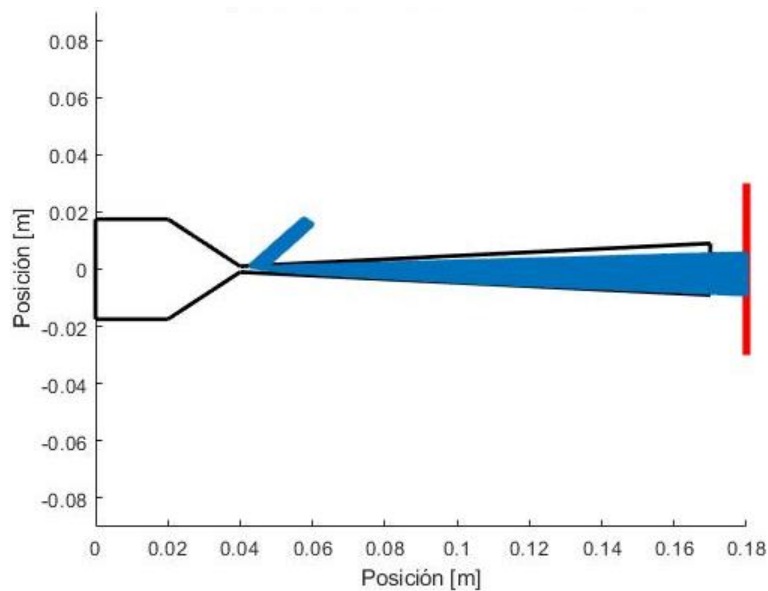


Figura 6.29. Trayectoria partículas de cobre en tobera con alimentador de 135°.

A priori, se puede observar que a medida que aumenta el ángulo de inclinación, la zona de impacto de las partículas con el sustrato baja de posición vertical. No obstante, para observar de manera más precisa la zona de impacto se pueden utilizar los perfiles de deposición. Éstos detallan en el eje x el volumen acumulado que se genera en cada zona del sustrato (recordando que el sustrato es discretizado en 200 divisiones), el cual es representado en el eje y.

6.8.1. Perfiles de deposición sin criterio de adhesión

Las distribuciones que se muestran en las siguientes figuras (Figura 6.30, Figura 6.31 y Figura 6.32) corresponden a la forma que se generaría si todas las partículas se adhirieran en el sustrato -caso ideal de eficiencia-.

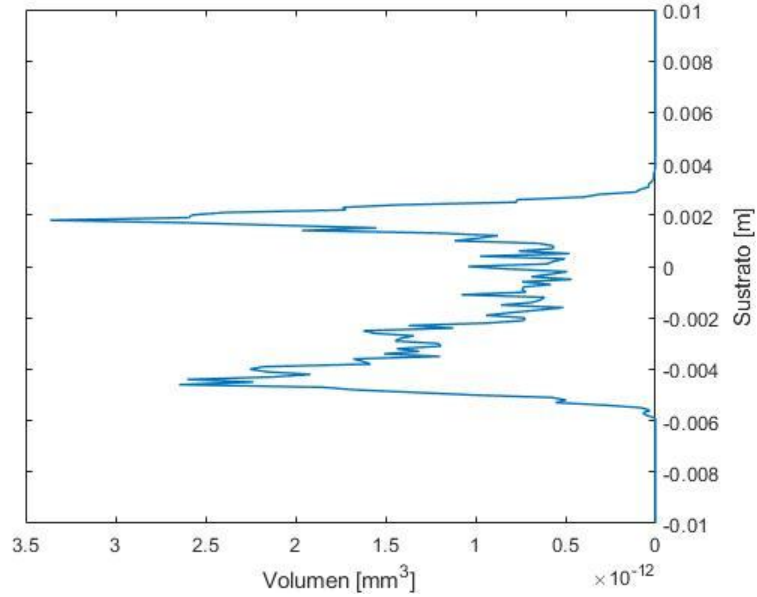


Figura 6.30. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 45°.

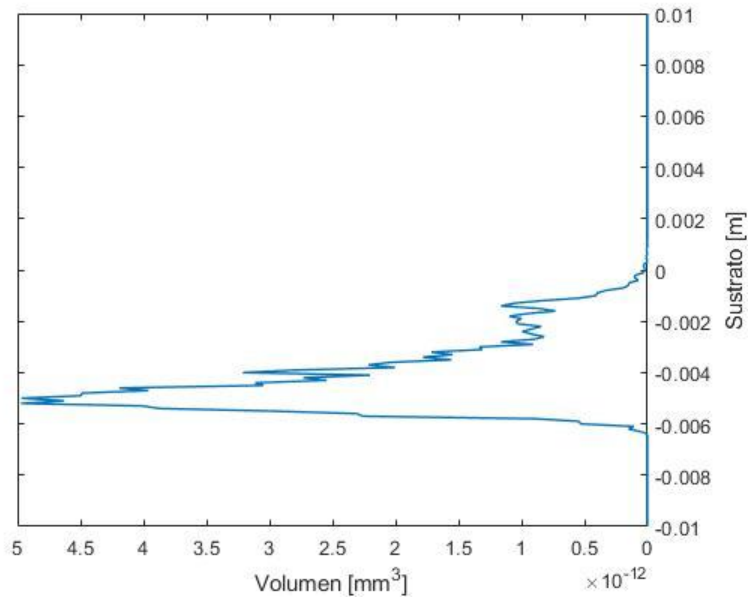


Figura 6.31. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 90°.

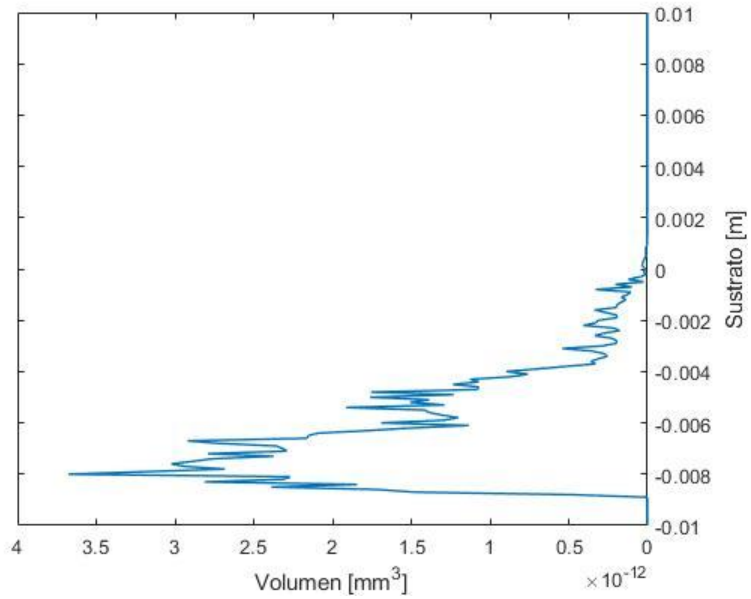


Figura 6.32. Perfil de deposición de todas las partículas en tobera con alimentador de 135°.

Dado que los perfiles no se encuentran en la misma escala entre ellos -se presentan de esta forma para tener una mejor definición del perfil en sí- en la Figura 6.33 se observa una comparación entre estos tres perfiles, notándose de esta forma la diferencia entre ellos.

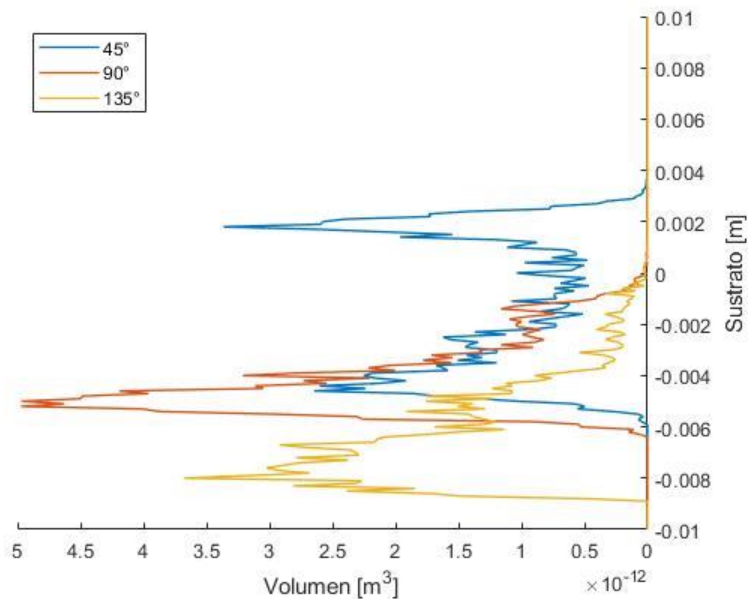


Figura 6.33. Comparación de los perfiles de deposición de cada alimentador para todas las partículas.

En la Tabla 6.5 se detallan las estadísticas referentes a la velocidad y temperatura de las 7.200 partículas cuando se encuentran con el sustrato, es decir, la velocidad y temperatura de impacto. Las estadísticas presentadas corresponden a los valores mínimo, promedio, máximo y desviación estándar para cada conjunto de 7.200 partículas inyectadas en cada tobera con distinto ángulo de inclinación de su alimentador.

Tabla 6.5 Valores mínimo, promedio, máximo y desviación estándar de temperatura y velocidad para el conjunto de 7.200 partículas en el impacto.

Ángulo de inclinación	Temperatura [K]	Velocidad [m/s]
45°	299,4 ± 13,3	484,8 ± 87,3
90°	302,8 ± 12,5	505,6 ± 100,2
135°	306,0 ± 15,2	475,1 ± 102,8

Por otro lado, en la Tabla 6.6 se presenta el tiempo de permanencia para cada conjunto de 7.200 partículas, este tiempo es considerado desde que la partícula sale del alimentador o, dicho de otra forma, desde que ingresa a la tobera, hasta que sale de ésta. Por lo tanto, el tiempo de permanencia entrega una noción de cuánto tiempo las partículas fueron arrastradas por el flujo de gas.

Tabla 6.6. Tiempo de permanencia mínimo, promedio, máximo y desviación estándar del conjunto de 7.200 partículas para cada alimentador.

Ángulo de inclinación	Tiempo de permanencia [s]
45°	$2,2 \cdot 10^{-3} \pm 6,2 \cdot 10^{-4}$
90°	$3,3 \cdot 10^{-3} \pm 9,8 \cdot 10^{-4}$
135°	$4,5 \cdot 10^{-3} \pm 7,7 \cdot 10^{-4}$

Con respecto a los tiempos de permanencia, se observa que las partículas en la tobera con alimentador de 135° poseen el mayor tiempo, esto se relaciona con la dirección horizontal que presentan las partículas al ingresar a la tobera (producto del ángulo de inclinación del alimentador). Luego, el alimentador que presenta el menor tiempo de permanencia es el que posee un ángulo de inclinación de 45°, ya que las partículas al ingresar a la tobera ya poseen velocidad horizontal a favor del flujo, por lo que las partículas tendrán un menor tiempo en el interior de la tobera. Finalmente, el punto medio entre estos dos, en lo que respecta tiempo de permanencia, es la tobera con alimentador de 90°, ya que no presenta velocidad horizontal al ingresar a la tobera.

Como se aprecia en las figuras anteriores, la zona de impacto y los perfiles de deposición difieren para cada alimentador. Aproximadamente, la zona de impacto para el alimentador de 45° abarca una superficie del sustrato desde los 4 mm hasta los -6 mm (largo total de 10 mm), para el alimentador de 90° la zona de impacto comprende una superficie desde los 0 mm hasta los -6 mm (largo total de 6 mm) y finalmente el alimentador de 135° impacta una zona desde los 0 mm hasta los -9 mm (largo total de 9 mm).

Por consiguiente, la tobera que presenta una mayor región de impacto corresponde al alimentador de 45° con 10 mm, luego lo sigue de cerca el alimentador de 135° con 9 mm y finalmente el de 90° con 6 mm, por lo que esta última presenta mayor precisión en la deposición. Además, se corrobora lo señalado a priori en lo que respecta la ubicación de la zona de impacto, ya que ésta decae -o baja de posición en el eje y- a medida que aumenta el ángulo de inclinación del alimentador de la tobera.

Con respecto a la forma de los perfiles, se observan claros *peaks* en el extremo inferior de las zonas de impacto, a excepción del alimentador de 45° que presenta *peaks* en ambos extremos - superior e inferior-, lo cual hace que tenga una forma particular en comparación a las otras dos toberas. Estas dos toberas (90° y 135°) poseen un perfil de deposición similar, los cuales se encuentran en distintas posiciones, ubicándose el perfil del alimentador de 90° más arriba que el perfil del alimentador de 135°.

Además, se observa claramente el ruido que presentan estos perfiles, esto se debe a la cantidad de partículas utilizada (7.200), ya que es una cantidad baja en comparación a las utilizadas en un proceso típico de *cold spray* y, por otro lado, depende de la discretización utilizada en el sustrato para generar estos perfiles, recordando que éste fue dividido en 200 secciones desde la posición vertical -10 mm hasta 10 mm, lo cual genera un tamaño de cada sección de sustrato de 0,1 mm. Este tamaño de sección se considera suficiente, ya que si se hace más pequeño el ruido aumenta, por otro lado, si se hace más grande el ruido disminuye, pero así también la resolución del perfil en sí. Por lo tanto, la forma de mejorar el suavizado y el ruido es añadiendo más partículas, esto último no es posible debido a las limitaciones técnicas, sin embargo, en la sección **6.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas**, se utiliza un método de post procesado para simular el uso de más partículas en la obtención de los perfiles de deposición.

En relación a la Tabla 6.5, se aprecia una superioridad en el alimentador de 90° en lo que respecta la velocidad de impacto, esto se debe a que las partículas en este alimentador, al no tener una velocidad horizontal en la entrada a la tobera, poseen el tiempo suficiente para acelerarse con el flujo. Esto no ocurre con los otros alimentadores de igual manera, ya que en el caso del alimentador de 45°, las partículas ya poseen una velocidad horizontal positiva (a favor del flujo), por lo que el tiempo que se encuentran dentro de la tobera y, por lo tanto, el tiempo que son aceleradas es inferior, alcanzando velocidades inferiores en comparación al alimentador de 90°. En relación al alimentador de 135°, las partículas poseen una velocidad horizontal negativa al ingresar a la tobera, por lo que las partículas ingresan a contraflujo, produciendo que éste se encargue de frenarlas y entregarles energía cinética para ser eyectadas de la tobera, este efecto (desaceleración y posterior aceleración) produce que las velocidades en este alimentador sean inferiores que el alimentador de 90°.

Asimismo, otro factor importante a considerar que tiene relación con la mayor deposición que presenta la tobera con alimentador de 90° es la trayectoria que presentan las partículas desde que son inyectadas. Ya que las partículas que se acercan a las paredes de la tobera durante su trayectoria se verán afectadas en lo que respecta su velocidad, debido a la velocidad del flujo de gas en las paredes -mayor velocidad en el centro de la tobera y disminuye hacia las paredes, ver

contornos de flujo-. Las partículas en esta tobera presentan la menor dispersión, como ya se señaló, y se depositan en zonas donde la velocidad del flujo de gas es alta, es decir, cercano al centro del sustrato. Por lo tanto, el alimentador juega un papel crucial en las trayectorias que tendrán las partículas y, por lo tanto, en el perfil de deposición.

Con respecto al efecto de la temperatura, como se aprecia en esta misma tabla, las diferencias no son significativas, en el caso del alimentador de 135° se puede notar que la temperatura de las partículas es levemente superior en comparación a los otros alimentadores, esto se debe a que las partículas poseen más tiempo en el interior de la tobera, por lo que las partículas poseen más tiempo para que el flujo les entregue calor. Luego, el intercambio de calor entre partícula y flujo se genera de manera similar para los tres alimentadores.

6.8.2. Perfiles de deposición con criterio de adhesión

Con respecto a los perfiles de deposición considerando criterio de adhesión, es decir, sólo utilizando las partículas que superan su velocidad crítica, se presentan a continuación en la Figura 6.34, Figura 6.35 y Figura 6.36.

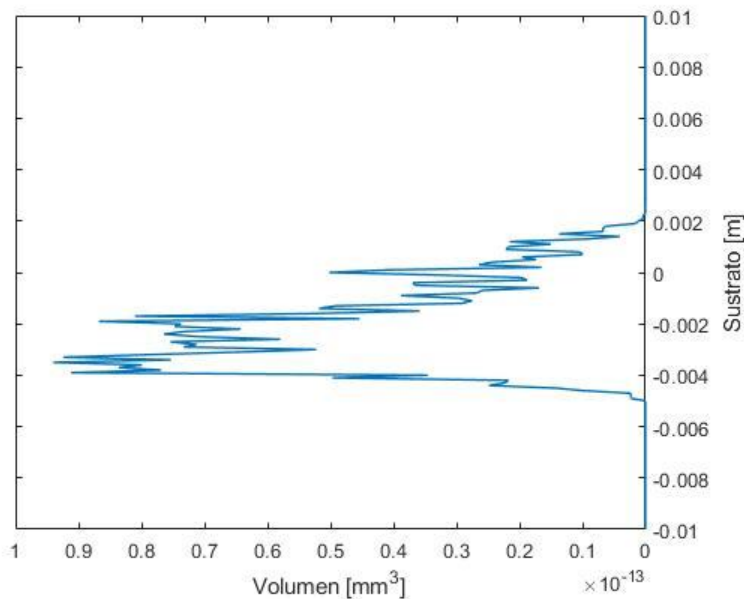


Figura 6.34. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 45°.

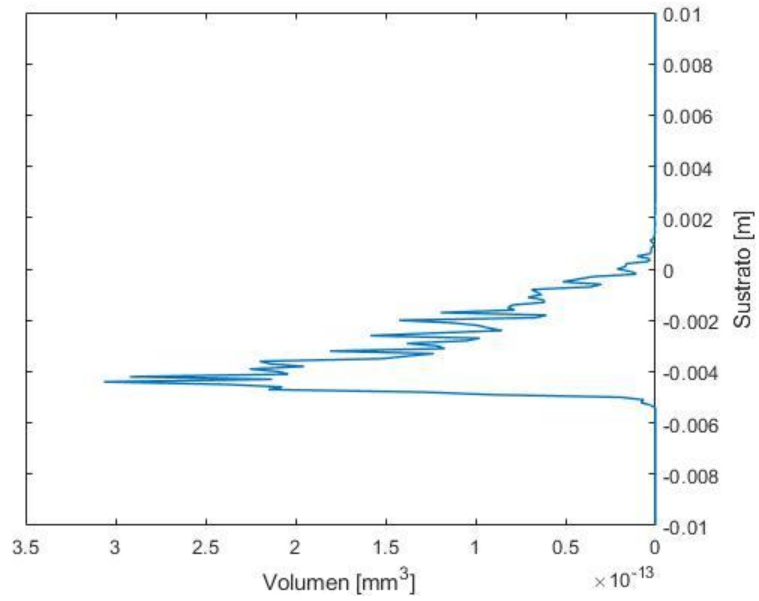


Figura 6.35. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 90°.

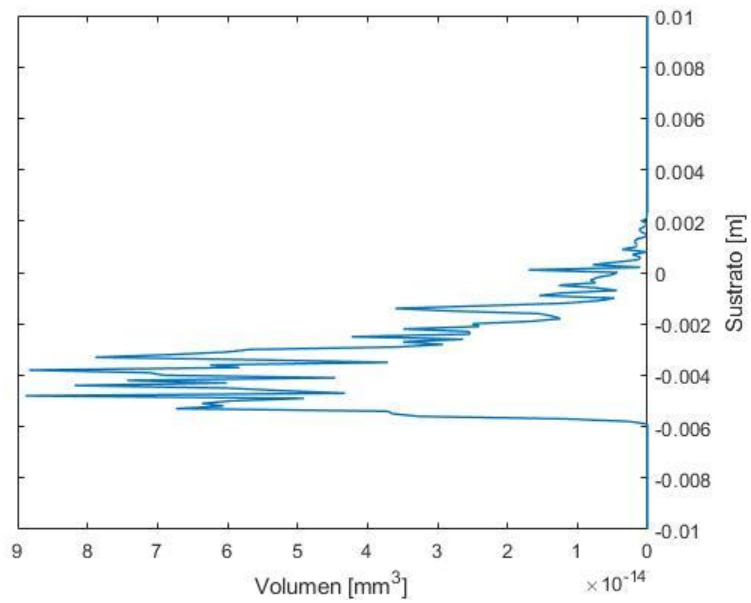


Figura 6.36. Perfil de deposición de partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica- en tobera con alimentador de 135°.

Asimismo, como en la sección anterior, se presenta en la Figura 6.37 la comparación de estos perfiles para poder observar la diferencia entre ellos a escala.

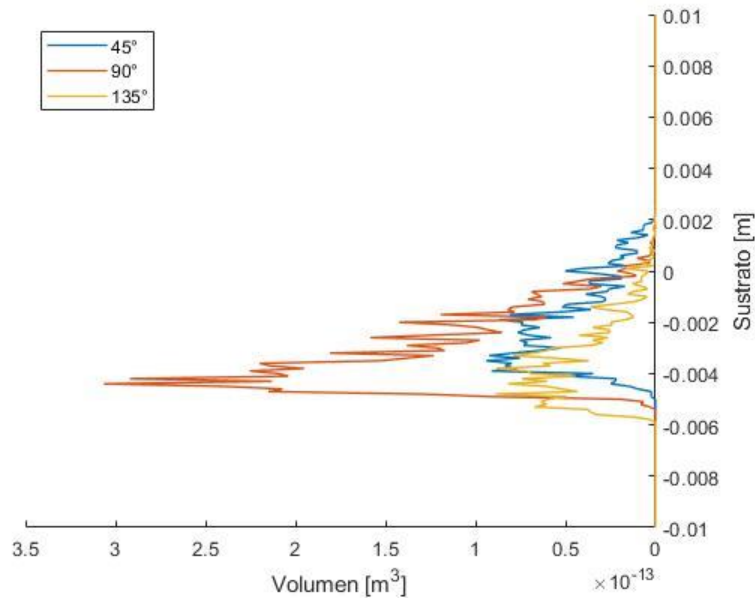


Figura 6.37. Comparación de los perfiles de deposición de cada alimentador para las partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica-.

Con respecto a los perfiles de deposición obtenidos para las partículas que cumplen con el criterio de adhesión se puede observar que poseen una zona en común con respecto a la base del perfil en sí. Esto se debe principalmente al flujo del gas que arrastra las partículas, ya que éste posee su velocidad máxima en el centro de la tobera y esta velocidad disminuye a medida que se acerca a la pared de la tobera. Por lo tanto, las partículas que alcanzan las mayores velocidades se encuentran en la zona central. Sin embargo, como se ve en la Figura 6.37, los perfiles se encuentran desplazados levemente hacia abajo, esto se debe a la componente negativa de la velocidad vertical de las partículas al viajar por el alimentador e ingresar a la tobera.

Además, en los resultados previos, se puede observar la clara superioridad en lo que respecta eficiencia de deposición para el caso del alimentador de 90°, el cual duplica aproximadamente los otros dos diseños. Esto se relaciona de manera directa con los resultados de la Tabla 6.5, ya que la velocidad de impacto que presenta este alimentador es superior en comparación a los otros alimentadores y, por lo tanto, la deposición también lo es.

Finalmente, cabe mencionar que los perfiles de deposición obtenidos para este caso -con criterio de adhesión- se ven afectados directamente al porcentaje de deposición para cada alimentador, ya que si éste varía, así mismo lo hará el perfil de deposición. Además, se debe tener en consideración que si aumenta el porcentaje de deposición, la forma no necesariamente tenderá al caso sin criterio de adhesión de manera inmediata, ya que la forma en cómo el perfil va cambiando desde el caso con criterio al caso sin criterio depende de muchos factores, como lo son la distribución de diámetros utilizada, las condiciones termodinámicas, los materiales utilizados, la geometría de la tobera, la separación entre tobera y sustrato, entre otros.

6.8.3. Comparación perfiles de deposición según criterio adhesión

Otra comparación que se realiza es entre los perfiles de deposición con criterio de adhesión y sin criterio, es decir, los perfiles con las partículas depositadas y todas las partículas. Las siguientes figuras (Figura 6.38, Figura 6.39 y Figura 6.40) muestran estas comparaciones para cada alimentador.

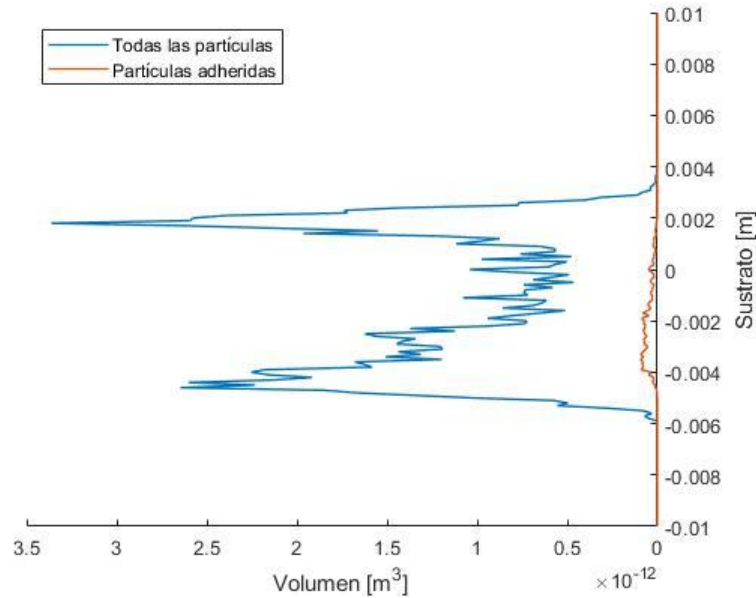


Figura 6.38. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 45°.

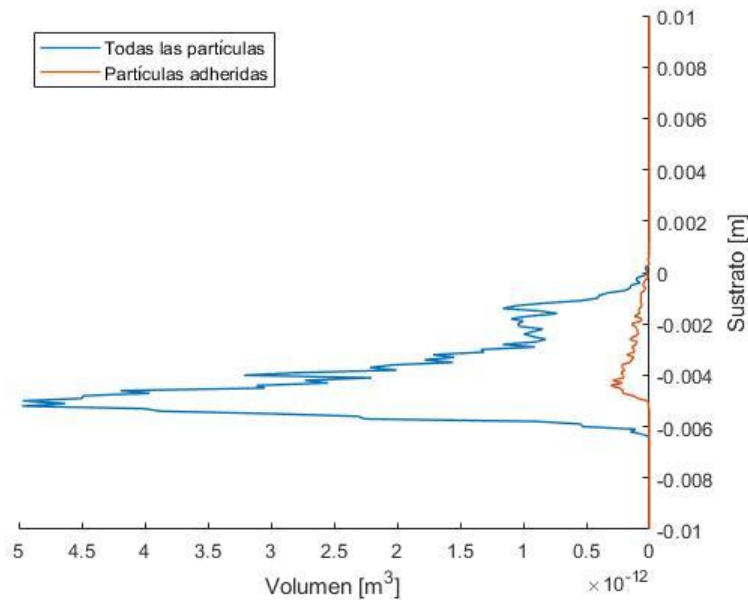


Figura 6.39. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 90°.

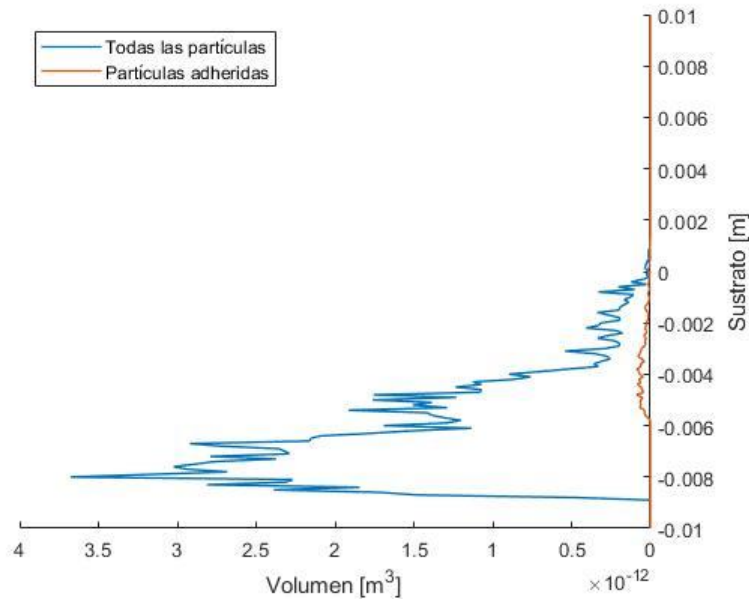


Figura 6.40. Comparación de los perfiles de deposición para las partículas depositadas -según criterio de velocidad crítica- y todas las partículas en tobera con alimentador de 135°.

Como se observa en las figuras anteriores, se logra apreciar las diferencias entre las partículas adheridas y todas las partículas, por ejemplo, con respecto a las superficies del sustrato que reciben impactos de partículas, pero no se adhieren (los extremos de la base del sustrato). Para el alimentador de 45°, se distingue que los extremos -que le dan la forma particular al perfil de deposición para todas las partículas- no son depositados para el caso en que se considera el criterio de adhesión. Asimismo ocurre, en menor medida, para el caso del alimentador de 90°, donde el extremo inferior no se deposita y, finalmente, para el alimentador de 135° donde el extremo inferior tampoco se deposita, pero en mayor cantidad. Por lo tanto, viéndolo desde un punto de vista de eficiencia de impacto, el alimentador de 90° es el que presenta menos pérdida de superficie si se compara la zona de impacto de ambos casos -caso con criterio y sin criterio de adhesión-. Esto último concuerda con lo señalado sobre esta tobera, ya que presenta una menor dispersión de partículas al momento del impacto.

Asimismo, es posible observar la baja tasa de deposición que se presenta en todos los casos. En donde el perfil de deposición para las partículas adheridas es mucho más pequeño que el perfil de deposición para todas las partículas.

Luego, en la Tabla 6.7 se presentan los resultados de los porcentajes de deposición para cada tobera. Estos porcentajes de deposición son presentados para el caso de partículas y masa.

Tabla 6.7. Porcentaje de deposición de partículas y masa para cada tobera.

Ángulo de inclinación del alimentador	Porcentaje de deposición de partículas	Porcentaje de deposición de masa
45°	26,31 %	2,72 %
90°	45,55 %	6,04 %
135°	28,07 %	2,19 %

Como se observa en los resultados referentes a la deposición de partículas y masa, se ve claramente que la tobera con un ángulo de inclinación de 90° de su alimentador presenta la mayor deposición, casi duplicando la deposición en el número de partículas y casi triplicando la deposición en lo que respecta la masa a sus toberas compañeras. Por lo tanto, en término de eficiencia de deposición, la tobera con alimentador en 90° es la óptima entre las tres opciones presentadas.

Por otro lado, los porcentajes de deposición de masa obtenidos resultan bastante bajos, ya que la deposición aceptable fluctúa entre 30 % y 40 %. Esto último puede deberse a varios factores, como lo son las propiedades termodinámicas del gas en la entrada, la presión del alimentador externo, la distribución de diámetros de partículas utilizada, la geometría de la tobera, la separación del sustrato, entre otros. Por lo tanto, si se desea mejorar la deposición de partículas se pueden modificar los parámetros indicados. Asimismo, si se comparan estos porcentajes de deposición -de partículas- con los porcentajes de deposición promedio obtenidos en la sección **6.3. Ubicación horizontal del alimentador** -específicamente en la Tabla 6.3- se obtienen porcentajes de deposición de partículas inferior para el caso de las toberas con alimentador, recordando que los resultados obtenidos en la Tabla 6.3 se obtienen inyectando las partículas desde el interior de la tobera, lo cual es imposible de realizar en la realidad y al realizar este tipo de inyección, las partículas hacen contacto con el flujo de manera más eficiente, generando un mejor arrastre de partículas y, por lo tanto, alcanzando velocidades mayores y mejor porcentaje de deposición.

A pesar de presentar una deposición baja, lo importante en esta investigación es observar la forma del perfil de deposición que se obtiene mediante la deposición de las partículas -teniendo como referencia el caso ideal, que corresponde a los perfiles sin criterio de adhesión, es decir, un 100% de porcentaje de deposición-. Además se pueden observar las diferencias entre los perfiles de deposición para cada tobera.

6.9. Flujo de partículas cerca del sustrato

Para conocer la distribución de los diámetros, velocidades en el eje x y temperaturas de las partículas previo a impactar el sustrato -a 1 mm antes de impactar específicamente- se obtienen los gráficos que muestran a las partículas en la región de análisis (Figura 4.13). Por lo tanto, a continuación, se presentan los resultados para cada tobera con su alimentador que la caracteriza, en donde el segmento vertical rojo que se observa en cada una de estas figuras corresponde al sustrato.

6.9.1. Diámetro de partículas previo al impacto

En las siguientes figuras (Figura 6.41, Figura 6.42 y Figura 6.43) se presentan los resultados de las distribuciones de diámetro de las partículas previo al impacto con el sustrato para las toberas con alimentador con ángulo de inclinación de 45° , 90° y 135° , respectivamente.

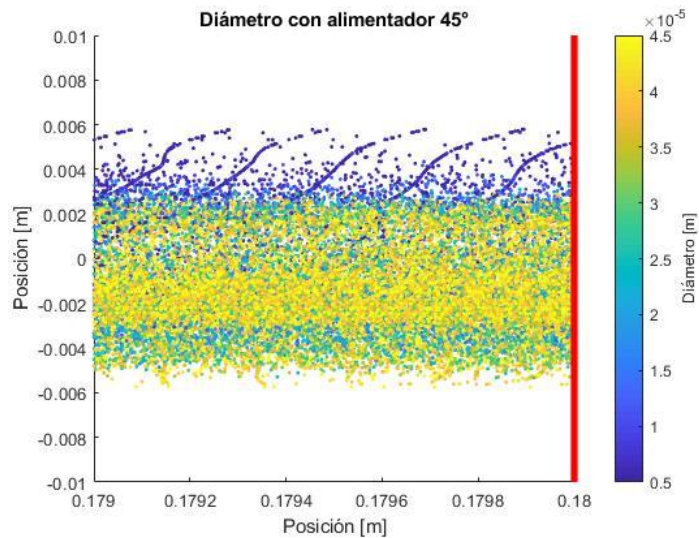


Figura 6.41. Distribución de diámetro de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45° .

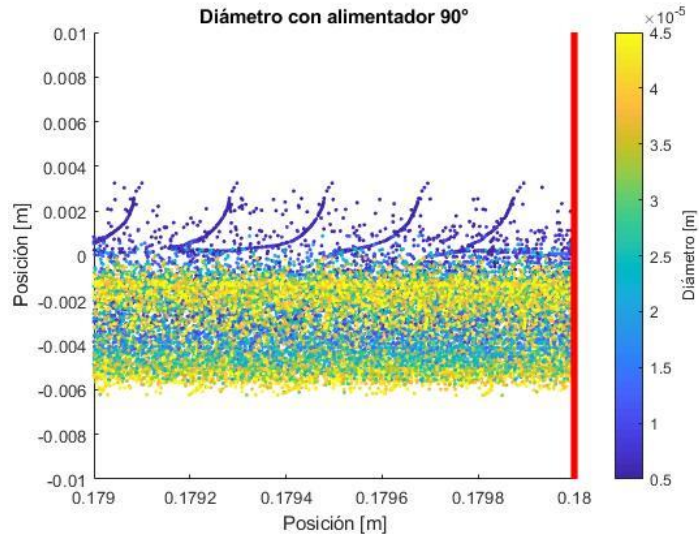


Figura 6.42. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45°.

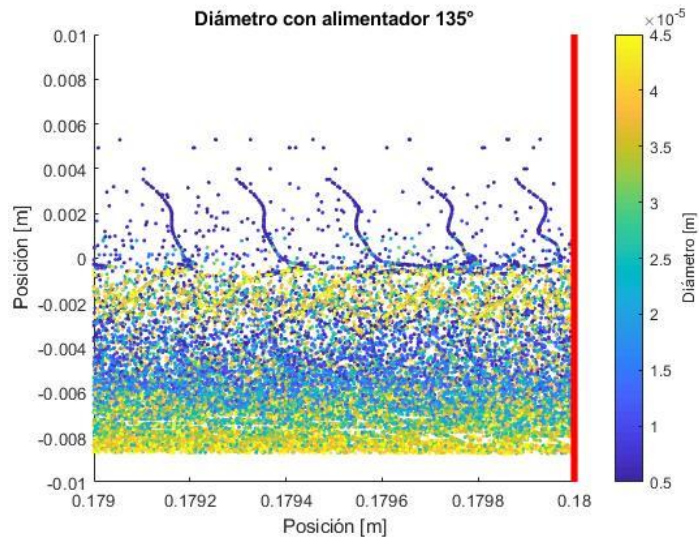


Figura 6.43. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 45°.

6.9.2. Velocidad de partículas previo al impacto

En las siguientes figuras (Figura 6.44, Figura 6.45 y Figura 6.46) se presentan los resultados de las distribuciones de velocidad de las partículas previo al impacto con el sustrato para las toberas con alimentador con ángulo de inclinación de 45° , 90° y 135° , respectivamente.

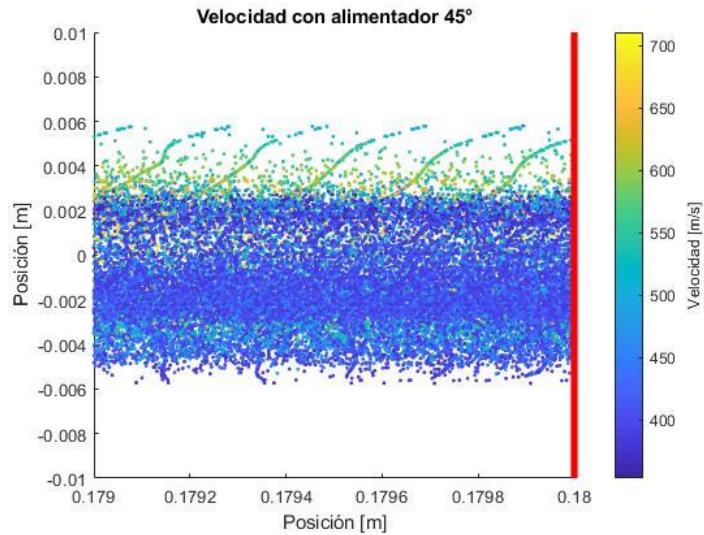


Figura 6.44. Distribución de diámetro de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90° .

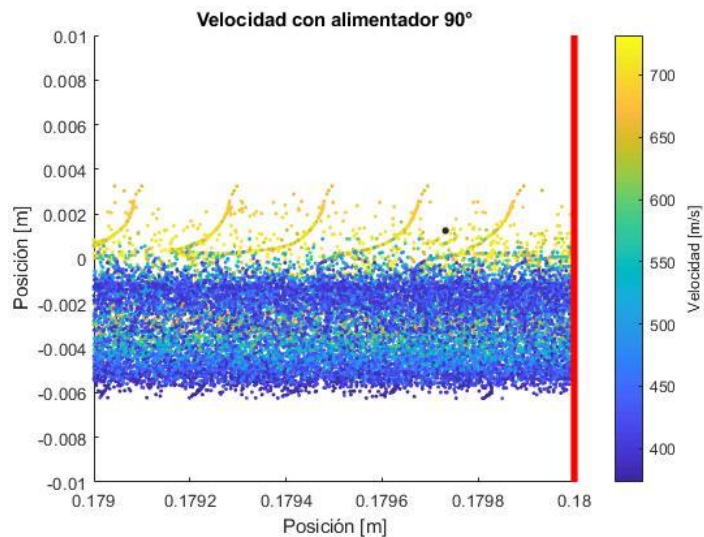


Figura 6.45. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90° .

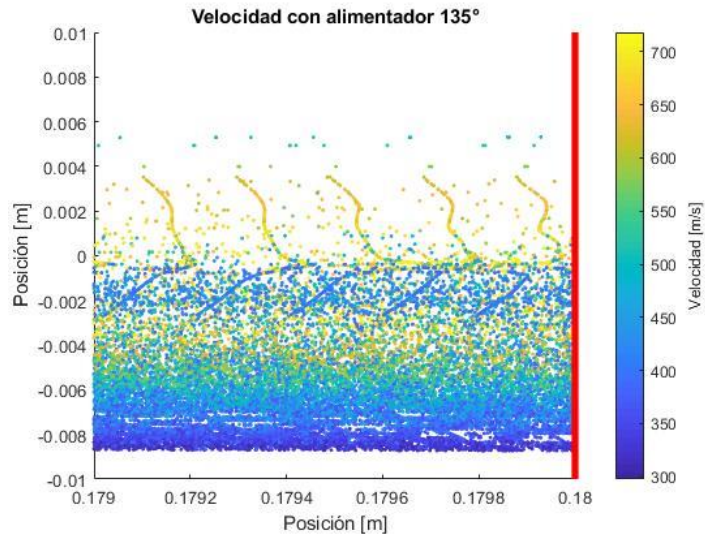


Figura 6.46. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 90°.

6.9.3. Temperatura de partículas previo al impacto

En las siguientes figuras (Figura 6.47, Figura 6.48 y Figura 6.49) se presentan los resultados de las distribuciones temperatura de las partículas previo al impacto con el sustrato para la toberas con alimentadores con ángulo de inclinación de 45°, 90° y 135°, respectivamente.

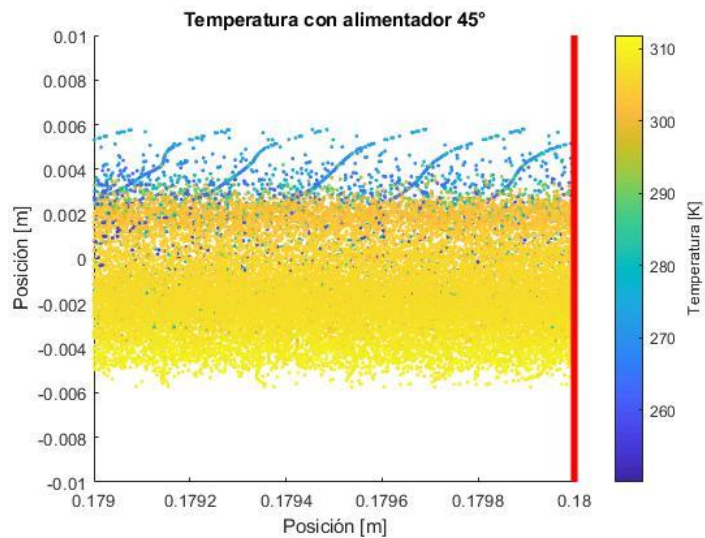


Figura 6.47. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.

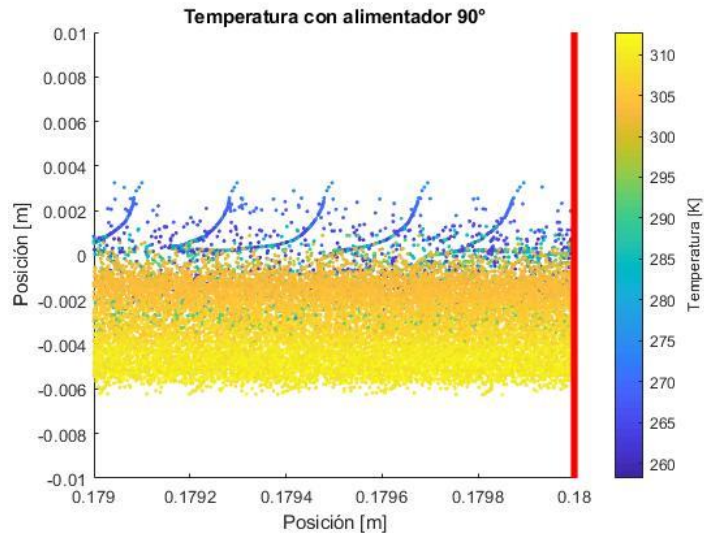


Figura 6.48. Distribución de velocidad de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.

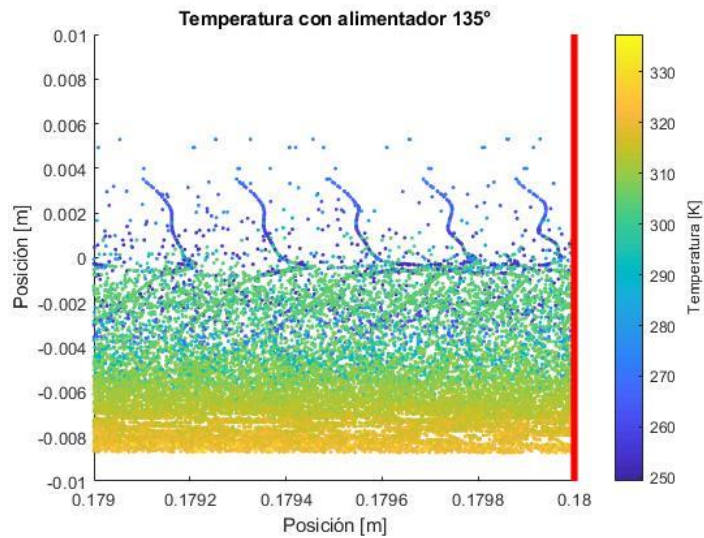


Figura 6.49. Distribución de temperatura de las partículas antes de impactar al sustrato para tobera con alimentador de 135°.

A partir de las figuras se puede observar que las partículas de mayor tamaño impactan en una zona cercana al centro del sustrato, levemente desplazado hacia abajo y algunas otras pocas partículas en la parte levemente superior al centro (eje horizontal, $y=0$) -a excepción del caso de alimentador de 135°, donde existe una mayor dispersión-. Asimismo, las partículas más pequeñas se ubican en la zona superior del sustrato principalmente.

Con respecto a la velocidad de las partículas previo al impacto, se observa en las figuras referentes a la velocidad que las partículas con mayor velocidad se encuentran en la parte superior, alcanzando velocidades máximas de 700 m/s aproximadamente, y las de menor velocidad en la zona inferior y algunas en la parte levemente superior al centro, con velocidades mínimas de 400 m/s aproximadamente. Esto último se relaciona de manera directa con el tamaño de partículas, ya que las partículas que alcanzan mayores velocidades son las partículas más pequeñas y viceversa.

La relación entre estos parámetros se debe a la inercia de las partículas, ya que las de mayor tamaño (mayor masa) requieren de más energía para ser aceleradas y, por lo tanto, de mayor tiempo en el flujo dentro de la tobera para alcanzar velocidades superiores. Por el contrario, las partículas pequeñas (menor masa) se aceleran más rápido y alcanzan mayores velocidades de impacto con el sustrato -a costa de una menor temperatura de impacto-.

La velocidad de las partículas también es responsable de que las más pequeñas se encuentren en la parte superior y las de mayor tamaño en la parte inferior del sustrato, ya que las partículas pequeñas al adquirir una mayor aceleración no alcanzan a descender lo suficiente, como así lo hacen las partículas de mayor tamaño. Para descender, las partículas requieren de una componente vertical en su velocidad, esta componente la obtienen desde que son inyectadas en el alimentador, ya que al ser absorbidas por el gas se les añade una componente vertical negativa a su velocidad vertical, la cual se puede observar sus efectos en las posiciones finales de las partículas.

En relación a la temperatura, se puede observar que las partículas con mayor temperatura son las partículas de mayor tamaño y tamaño medio, ya que la inercia térmica de las partículas de este tamaño es mayor, requiriendo más tiempo para ser enfriadas. Por el contrario, las partículas de menor tamaño al poseer una menor inercia térmica, se enfrían rápidamente al salir de la tobera como ya se señaló previamente, alcanzando temperaturas incluso inferior a la temperatura de ingreso. En relación al rango de la temperatura de las partículas, fluctúan entre un 260 K y 310 K aproximadamente.

En la tobera con alimentador de 90° se observa una clara disminución de partículas de mayor tamaño en el centro del sustrato, las cuales se encuentran presentes en la parte inferior del sustrato principalmente. Además, se observa que las partículas presentan una mayor velocidad en comparación a la tobera con alimentador de 45°, esto se relaciona con que el gas en esta tobera presenta la mayor velocidad en comparación a las otras toberas. Con respecto a la temperatura, se tiene un comportamiento similar a la tobera con alimentador de 45° a excepción de las partículas en su parte superior, las cuales se encuentran a menor temperatura -debido a que alcanzan mayores velocidades-.

Por último, con respecto a la tobera con alimentador de 135°, se observa una clara diferencia entre las dos anteriores, ya que ésta presenta una distribución de los parámetros más homogénea. La distribución de diámetros muestra que las partículas más pequeñas se encuentran en la zona superior y las más grandes en la parte inferior y algunas en el centro -en menor cantidad-. Asimismo ocurre con la velocidad y la temperatura, en donde se observa el gradiente de colores de éstas de manera uniforme a medida que se mueve por el sustrato. Por lo tanto, esta tobera genera un mejor reordenamiento de los diámetros previo al impacto.

La forma de los perfiles, en consecuencia, se comprende mediante las figuras mostradas en esta sección, ya que entendiendo el comportamiento de las partículas según su diámetro al ingresar al gas se puede relacionar esto con los perfiles de deposición, específicamente, observando las

figuras de distribución de diámetros. Si se comparan estas distribuciones con los perfiles de deposición para todas las partículas y teniendo en consideración que las partículas de menor diámetro son las que se depositan principalmente, como ya se observó en la sección **6.3. Ubicación horizontal del alimentador**, se logra apreciar que las posiciones de las partículas de menor diámetro coinciden con las posiciones donde el perfil de deposición presenta mayor altura, por ejemplo, para el caso de la tobera con alimentador de 45° es posible observar partículas de diámetro pequeño en las posiciones donde se generan los *peaks* en el perfil de deposición.

Otro de los factores que se debe tener en consideración para cada caso es cómo se ve afectada la dirección de la velocidad de las partículas desde que ingresan por el alimentador hasta que intersecan el flujo de gas proveniente del ingreso de la tobera, ya que para el caso de la tobera con alimentador de 45° las partículas ingresan a la tobera con una velocidad horizontal positiva -a favor del flujo- y vertical negativa, en la tobera con alimentador de 90° las partículas ingresan a la tobera sólo con velocidad vertical negativa -velocidad horizontal nula- y en la tobera con alimentador de 135° las partículas ingresan con velocidad negativa vertical y horizontal. Luego de intersecar el flujo de gas proveniente del ingreso de la tobera las partículas adquieren una gran velocidad horizontal, la cual se suma a la velocidad con la cual ingresan a la tobera. Por lo tanto, las partículas que ingresan por el alimentador de 45° no poseen suficiente tiempo para ser aceleradas, ya que además presentan el menor tiempo de permanencia, luego las partículas que ingresan por el alimentador de 135° al encontrarse en contraflujo, primero son desaceleradas y luego adquieren la velocidad a favor del flujo, por lo que el tiempo de permanencia es “desperdiciado” en la desaceleración de las partículas y, finalmente, el caso que presenta un equilibrio entre los fenómenos señalados es la tobera con alimentador de 90° , ya que al no poseer una velocidad horizontal, las partículas son aceleradas a favor del flujo durante el tiempo de permanencia, sin afectar de manera negativa este tiempo -como lo es en el caso del alimentador de 45° -. Estas diferencias en lo que respecta la dirección de velocidades es la responsable de tener distintos perfiles de deposición y porcentajes de deposición para cada caso.

En todas las figuras anteriores se observan patrones verticales en la parte superior del sustrato. Estos patrones corresponden a las curvas verticales que se observan, además es posible detallar que éstas son partículas del mismo diámetro para cada caso. Los patrones son formados debido a la forma en cómo son obtenidos estos gráficos, ya que como se señaló en la sección **4.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas**, en estos gráficos se ilustran las posiciones de las partículas dentro de la región de análisis, es decir, mediante los resultados entregados por ANSYS se muestran todas las veces que la partícula posee información dentro de la región de análisis. Por lo tanto, las partículas que viajan a mayor velocidad -las más pequeñas- poseen menos cantidad de datos en la región de análisis, por lo cual se muestra una cantidad de veces inferior con respecto a las partículas que viajan más lento. Es así cómo se generan estos patrones en la parte superior del sustrato, donde la cantidad de datos de las partículas pequeñas que se encuentran en los perfiles aparecen 5 veces aproximadamente -número de curvas verticales-.

Para comprender de mejor manera lo previamente señalado, se obtiene un gráfico donde se representan las posiciones de todas las partículas para el mismo instante de tiempo en función del diámetro, este gráfico se ilustra en la Figura 6.50. El gráfico se obtiene para la tobera con alimentador de 45° , sin embargo, para el caso de las otras toberas el comportamiento de traslación

de las partículas es similar y, por lo tanto, se comprende la forma de los patrones a partir de esta tobera. Como se observa en la figura, las partículas se mueven siguiendo la forma del contorno de velocidades y se pueden apreciar las curvas verticales que generan los patrones previo al impacto de las partículas de menor tamaño en la parte superior del eje $y = 0$.

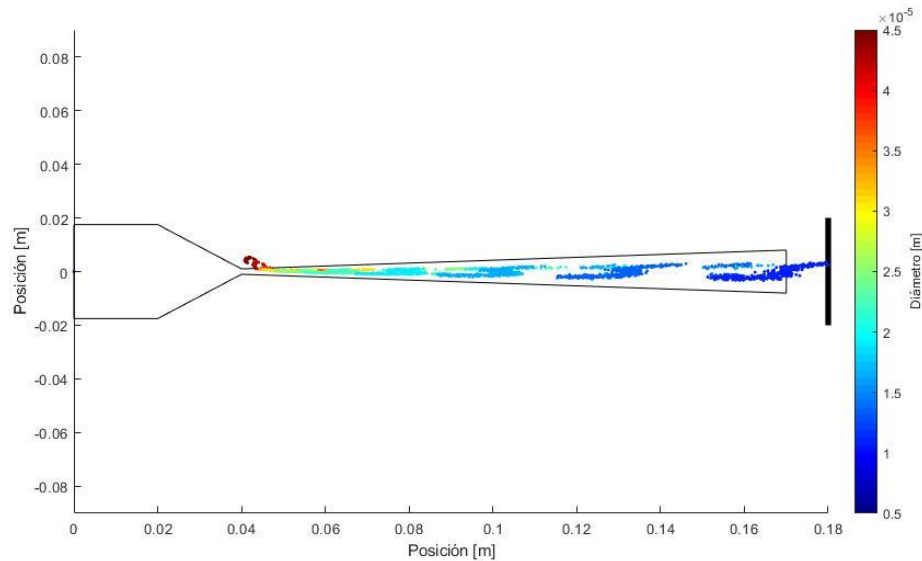


Figura 6.50. Trayectoria de las partículas en función del diámetro en tobera con alimentador de 45° para $t=0,0018$ s.

6.10. Aproximación perfiles de deposición para más partículas

Para obtener aproximaciones de los perfiles de deposición durante 2 segundos de funcionamiento del proceso de *cold spray*, utilizando los diseños de tobera con distintos alimentadores y las condiciones termodinámicas definidas previamente, en base a una tasa de consumo de masa de 90 g/min ($11,66 \cdot 10^{-4}$ kg/s) del polvo metálico de cobre, se obtiene la cantidad de veces que debe añadirse el conjunto de 7.200 partículas con nuevas posiciones de impacto para cada una de éstas.

La masa total que posee el conjunto de 7.200 partículas, con su distribución de diámetros correspondiente, equivale a $9,14 \cdot 10^{-7}$ kg, por lo tanto, para inyectar partículas durante 2 segundos -en base a la tasa de consumo de masa- se requieren 128 repeticiones del nuevo conjunto de 7.200 partículas, lo cual se traduce en 921.600 partículas.

Por consiguiente, añadiendo estas nuevas partículas -cada una con su nueva posición de impacto, dada la aleatoriedad utilizada- se obtiene una aproximación del perfil de deposición para cada alimentador. Este proceso se realiza para los perfiles de deposición considerando criterio de adhesión y sin considerarlo, es decir, considerando sólo las partículas adheridas que superan su velocidad crítica y, por otro lado, considerando que todas las partículas se añaden.

Cabe recalcar que los resultados para el caso con criterio de adhesión poseen los mismos porcentajes de deposición al caso original de 7.200 partículas presentado en la sección **6.8.2. Perfiles de deposición con criterio de adhesión**, ya que las nuevas partículas añadidas poseen sólo distinta posición de impacto, lo cual no afecta el porcentaje de deposición.

6.10.1. Perfiles de deposición sin criterio de adhesión

En la Figura 6.51 se presentan los perfiles de deposición para cada alimentador sin considerar criterio de adhesión, es decir, todas las partículas se adhieren y generan el perfil de deposición.

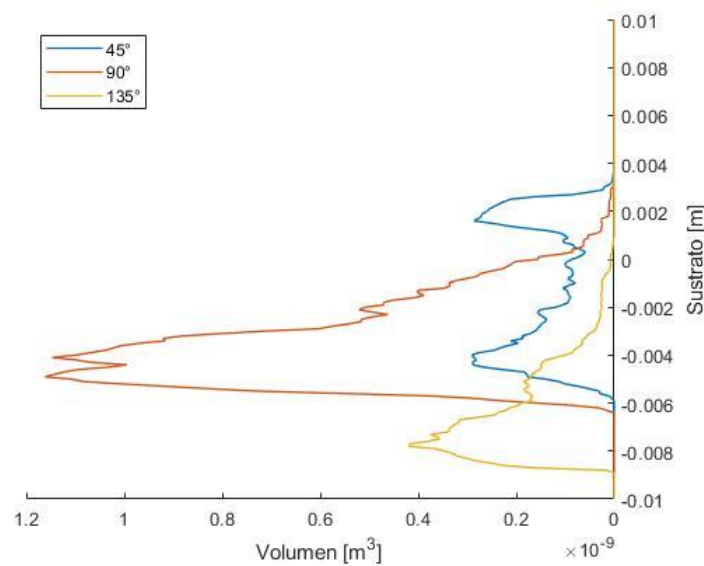


Figura 6.51. Comparación de las aproximaciones de los perfiles de deposición de cada alimentador para todas las partículas.

6.10.2. Perfiles de deposición con criterio de adhesión

En la Figura 6.52 se presentan los perfiles de deposición para cada alimentador considerando el criterio de adhesión de velocidad crítica, por lo cual, en éstos se encuentran sólo las partículas que superaron su velocidad crítica.

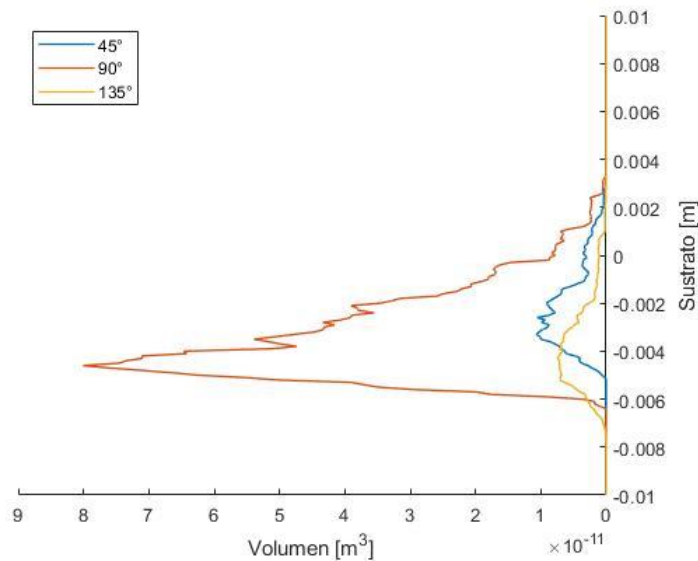


Figura 6.52. Comparación de las aproximaciones de los perfiles de deposición de cada alimentador para las partículas adheridas -según criterio de velocidad crítica-.

Observando todos los resultados anteriores se puede notar una clara mejoría en la definición y suavizado de las curvas con respecto a los perfiles de deposición obtenido para las 7.200 partículas. Cabe considerar que la forma de los perfiles puede haber sufrido modificaciones producto de esta aproximación, ya que se utilizan 921.600 nuevas partículas, cantidad equivalente a 128 veces el resultado original con nuevas posiciones para cada partícula.

Por consiguiente, los perfiles presentados en estas aproximaciones se consideran como una mejor representación de lo que se esperaría en la práctica que sucediese con estas toberas y sus perfiles de deposición. El número de partículas que son eyectadas durante un proceso de *cold spray* promedio supera fácilmente el millón de partículas, por lo cual, con respecto al número de partículas, 7.200 unidades es una cantidad muy baja de partículas para obtener un perfil de deposición confiable.

Luego, si se comparan los resultados de los perfiles de deposición para todas las partículas entre el caso con 7.200 partículas versus el caso aproximado con 921.600 partículas, los cambios más relevantes entre éstos son que para la tobera con alimentador de 45° el nuevo perfil presenta los dos *peaks* a la misma altura y se nota la forma cóncava que presenta el perfil (forma de medialuna), con respecto a la tobera con alimentador de 90° se observa una diferencia en la zona de impacto, en donde ésta aumenta para el nuevo perfil, ya que la curva llega a una posición de 2 mm más arriba en comparación al caso de 7.200 partículas, además la forma del perfil es más robusta, ya que se aprecia un ensanchamiento del mismo. Por otro lado, la tobera con alimentador de 135° no presenta cambios relevantes además de los ya mencionados referente a la mejora en la definición de la curva.

6.11. Altura de la deposición

En el siguiente gráfico (Figura 6.53) se presentan las alturas de deposición para cada tobera durante 2 segundos de operación del proceso de *cold spray*. Ésta se obtiene dividiendo el volumen obtenido para los perfiles de deposición por el paso del sustrato y la profundidad de este mismo (0,1 mm y 2 mm respectivamente).

Estas figuras son presentadas en escala 1:20 (altura:sustrato), ya que en escala 1:1 no se observa el perfil de altura de deposición debido a lo pequeño que es con respecto al sustrato.

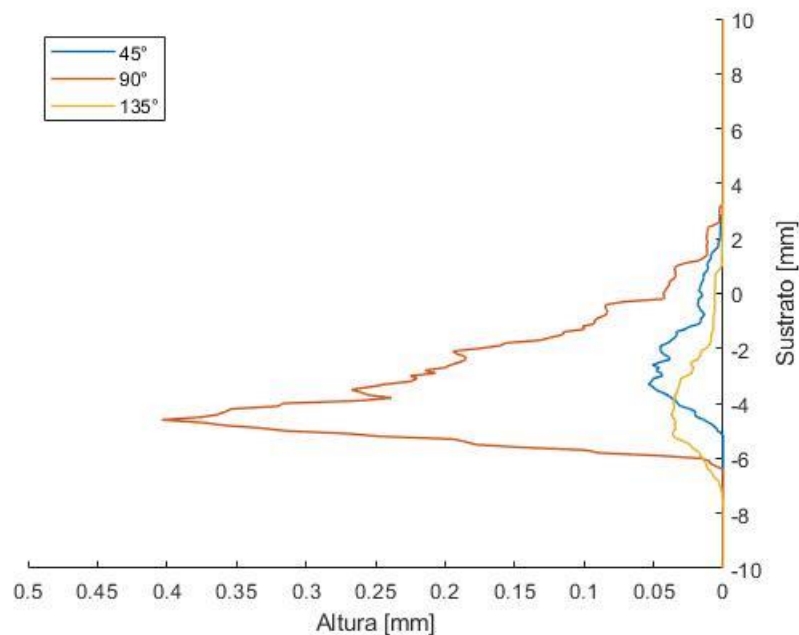


Figura 6.53. Alturas de deposición de cada tobera durante 2 segundos de deposición de partículas.

Como se puede observar en la figura anterior, la altura de deposición máxima se obtiene para la tobera con alimentador de 90°, la cual alcanza los 0,40 mm. Por otro lado, las toberas con alimentador de 45° y 135° alcanzan una altura máxima similar de 0,05 mm o 50 μm . Esta diferencia se debe a la eficiencia de deposición que posee la tobera con alimentador de 90°, la cual casi triplica el porcentaje de deposición de masa con respecto a las otras dos toberas.

La altura de deposición para el tiempo de operación utilizado concuerda con los rangos usuales de altura de deposición del proceso de *cold spray*, ya que las alturas máximas obtenidas son de 50 μm , 400 μm y 40 μm para las toberas con alimentador de 45°, 90° y 135°, respectivamente.

7. Conclusiones

- La influencia del ángulo de inclinación con respecto al perfil de deposición generado es decisiva, obteniéndose perfiles completamente distintos para cada alimentador, esto se debe a que el perfil de deposición generado depende principalmente de la posición de las partículas en el impacto. Por otro lado, con respecto a la temperatura de impacto, ésta no varía significativamente entre los distintos alimentadores.
- La utilización de 7.200 partículas no es una cantidad suficiente para obtener un perfil de deposición con una buena definición. Sin embargo, para lograr simular una cantidad mucho mayor de partículas se requiere de un computador con características muy superiores a un computador promedio.
- La dirección de la velocidad de ingreso de las partículas y, por lo tanto, el ángulo de inclinación del alimentador juega un papel crucial en la velocidad de impacto de las partículas. Obteniéndose mejores resultados -menor dispersión de partículas en el impacto y mayor porcentaje de deposición- para el caso en que la velocidad horizontal de ingreso es nula (alimentador de 90°). Asimismo, esto relaciona con la trayectoria que describen las partículas durante su viaje desde que son inyectadas, ya que si éstas viajan por zonas donde la velocidad del gas es mayor, presentarán una mayor velocidad de impacto y, por lo tanto, una mayor deposición -como ocurre en la tobera con alimentador de 90° -.
- Las geometrías de las toberas utilizadas pueden ser optimizadas para el gas y partículas granuladas utilizadas para mejorar la deposición. Asimismo, se puede realizar un análisis que optimice la ubicación del sustrato.
- Los resultados obtenidos son un primer paso en la relación ángulo de inclinación del alimentador versus perfil de deposición. Estos resultados colaboran en la investigación relacionada con impresión 3D mediante cold spray.
- La forma del perfil de deposición nunca será completamente predecible producto de los efectos de turbulencia en el gas.
- Dependiendo de los requerimientos del usuario, éste puede hacer uso de distintos alimentadores, ya que la forma del perfil de deposición se asemejará a los obtenidos de manera numérica. En caso de requerir un perfil con forma cóncava, se recomienda el uso de un alimentador de 45° y en caso de requerir una forma como una campana de Gauss, se recomienda utilizar un alimentador de 90° -el de 135° posee una forma muy similar, pero con menor eficiencia de deposición-.

En relación a trabajos futuros relacionados con el presente trabajo, se propone:

- Obtención de resultados experimentales. El presente trabajo fue pensado en una futura construcción y validación de resultados, es por este motivo que se utilizó una tobera plana, por ejemplo.

- Proponer distintos métodos de alimentación, es decir, distintas ubicaciones -ya sea antes del ingreso a la tobera o previo a la garganta-.
- Optimización de parámetros como geometría de la tobera para nitrógeno y partículas de cobre. Y obtención de la posición del sustrato que genere un mayor porcentaje de deposición.
- Obtener ángulo de inclinación óptimo para maximizar la deposición de partículas.
- Si existe la posibilidad de acceder a un computador con mayor capacidad, simular un número mayor de partículas y comparar resultados con la aproximación de los perfiles de deposición obtenidos en este trabajo.


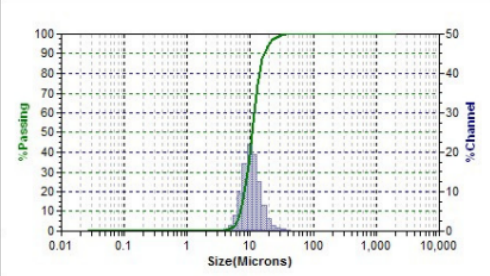
8. Bibliografía

- [1] Zheng W, Derushie C, Lo J, Essadigi E (2006) Corrosion protection of joining areas in magnesium die cast and sheet products. *Mater Sci Forum* 546–549:523–528.
- [2] Pattison, J., Celotto, S., Khan, A., & O’Neill, W. (2008). Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process. *Surface and Coatings Technology*, 202(8), 1443–1454.
- [3] T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye y T. Klassen, "From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying", 2009.
- [4] Pattison, J., Celotto, S., Khan, A., & O’Neill, W. (2008). Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process. *Surface and Coatings Technology*, 202(8), 1443–1454.
- [5] Dinavahi, S., Champagne, V. K., & Helfrich, D. J. (2009). Comparison of empirical and theoretical computations of velocity for a cold spray nozzle. Department of Defense Proceedings of the High Performance Computing Modernization Program - Users Group Conference, HPCMP-UGC 2009, (September 2014), 27–31.
- [6] Parot, M. (2019). Modelamiento fluido-dinámico de microtoberas de cold spray para la depositación de partículas de cobre utilizando mezclas helio-nitógeno.
- [7] D. Grasmé, "First serial application of cold spraying for coating heat sinks", 2003, p 119-122.
- [8] Zheng W, Derushie C, Lo J, Essadigi E (2006) Corrosion protection of joining areas in magnesium die cast and sheet products. *Mater Sci Forum* 546–549:523–528.
- [9] Champagne, V. K., Champagne, V. K., & Widener, C. (2017). Cold spray applications. In *Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future perspectives*.
- [10] Fernandez, R., & Jodoin, B. (2018). Cold Spray Aluminum–Alumina Cermet Coatings: Effect of Alumina Content. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27(4), 603–623. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0702-6>
- [11] Assadi, H., Schmidt, T., Richter, H., Kliemann, J. O., Binder, K., Gärtner, F., ... Kreye, H. (2011). On parameter selection in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(6), 1161–1176.
- [12] F. G. Schmitt, "About Boussinesq’s turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity," *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 335, no. 9–10, pp. 617–627, 2007.
- [13] ANSYS. 2009. Density-Based Solver. [online] Disponible en: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node362.htm>> [Acceso 25 de Marzo de 2020].
- [14] Van Driest E. R., "On Turbulent Flow Near a Wall," *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 23, no. 11, pp. 1007–1011, 1956.
- [15] A. Lieberman, "Comparison of Predicted and Experimental Wall Temperatures for a Cylindrical Ejector Exhaust Nozzle Operated with Turbojet Gas Generator," Nasa Technical Note TN D-6465, no. August. 1971.

- [16] Ansys Inc., “Hybrid Initialization,” in *ANSYS FLUENT Theory Guide 15.0*, 2013, pp. 683–684.
- [17] Ansys Inc., “High-Mach-Number Drag Law,” in *ANSYS FLUENT Theory Guide 15.0*, 2013, p. 386.
- [18] Ansys Inc., “Spherical Drag Law” in *ANSYS FLUENT Theory Guide 15.0*, 2013, p. 385.
- [19] W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr.. "Vaporation from Drops, Part I". Chem. Eng. Prog. 48(3). 141–146. March 1952.
- [20] W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr.. "Evaporation from Drops, Part I and Part II". Chem. Eng. Prog. 48(4). 173–180. April 1952.
- [21] Sova, A., Smurov, I., Doubenskaia, M., & Petrovskiy, P. (2018). Deposition of aluminum powder by cold spray micronozzle. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9–12), 3745–3752.
- [22] Sova A, Klinkov S, Kosarev V, Ryashin N, Smurov I (2013) Preliminary study on deposition of aluminium and copper powders by cold spray micronozzle using helium. *Surf Coat Technol* 220: 98–101.
- [23] Sova, A., Okunkova, A., Grigoriev, S., & Smurov, I. (2013). Velocity of the particles accelerated by a cold spray micronozzle: Experimental measurements and numerical simulation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(1), 75–80.
- [24] Fernández, R., MacDonald, D., Nastić, A., Jodoin, B., Tieu, A., & Vijay, M. (2016). Enhancement and Prediction of Adhesion Strength of Copper Cold Spray Coatings on Steel Substrates for Nuclear Fuel Repository. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(8), 1577–1587.
- [25] MacDonald, D., Leblanc-Robert, S., Fernández, R., Farjam, A., & Jodoin, B. (2016). Effect of Nozzle Material on Downstream Lateral Injection Cold Spray Performance. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(6), 1149–1157.
- [26] Schmidt, T., Klassen, T., Stoltenhoff, T., Gärtner, F., Assadi, H., Richter, H., & Kreye, H. (2009). From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5–6), 794–808.

9. Anexos

9.1. Anexo A

Cu-159 Aleks			SOP Name: None																																																																																																																																																																																																																				
 10.6.1	Cu-159																																																																																																																																																																																																																						
	1																																																																																																																																																																																																																						
	11/16/2015 11:26	S3000/S3500																																																																																																																																																																																																																					
	DB Rec: 200	S3787																																																																																																																																																																																																																					
Summary		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Size %</th> <th colspan="2">%Tile</th> </tr> <tr> <th>Size(um)</th> <th>%Tile</th> <th>Size(um)</th> <th>%Tile</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10.00</td><td>7.09</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20.00</td><td>8.16</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>30.00</td><td>9.01</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40.00</td><td>9.79</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>50.00</td><td>10.58</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>60.00</td><td>11.46</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>70.00</td><td>12.51</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80.00</td><td>13.94</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>90.00</td><td>16.49</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>95.00</td><td>19.42</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Size %		%Tile		Size(um)	%Tile	Size(um)	%Tile	10.00	7.09			20.00	8.16			30.00	9.01			40.00	9.79			50.00	10.58			60.00	11.46			70.00	12.51			80.00	13.94			90.00	16.49			95.00	19.42			Peak Summary <table border="1"> <thead> <tr> <th>Dia(nm)</th> <th>Vo%</th> <th>Width</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10.58</td> <td>100.0</td> <td>6.95</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>			Dia(nm)	Vo%	Width	10.58	100.0	6.95																																																																																																																																																												
Size %		%Tile																																																																																																																																																																																																																					
Size(um)	%Tile	Size(um)	%Tile																																																																																																																																																																																																																				
10.00	7.09																																																																																																																																																																																																																						
20.00	8.16																																																																																																																																																																																																																						
30.00	9.01																																																																																																																																																																																																																						
40.00	9.79																																																																																																																																																																																																																						
50.00	10.58																																																																																																																																																																																																																						
60.00	11.46																																																																																																																																																																																																																						
70.00	12.51																																																																																																																																																																																																																						
80.00	13.94																																																																																																																																																																																																																						
90.00	16.49																																																																																																																																																																																																																						
95.00	19.42																																																																																																																																																																																																																						
Dia(nm)	Vo%	Width																																																																																																																																																																																																																					
10.58	100.0	6.95																																																																																																																																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Data</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>MV(um)</td><td>11.43</td></tr> <tr><td>MN(um)</td><td>8.05</td></tr> <tr><td>MA(um)</td><td>10.12</td></tr> <tr><td>CS</td><td>5.93E-01</td></tr> <tr><td>SD</td><td>3.48</td></tr> <tr><td>Mz</td><td>11.04</td></tr> <tr><td>en</td><td>3.73</td></tr> <tr><td>Ski</td><td>0.2706</td></tr> <tr><td>Kg</td><td>1.187</td></tr> </tbody> </table>		Data	Value	MV(um)	11.43	MN(um)	8.05	MA(um)	10.12	CS	5.93E-01	SD	3.48	Mz	11.04	en	3.73	Ski	0.2706	Kg	1.187																																																																																																																																																																																																		
Data	Value																																																																																																																																																																																																																						
MV(um)	11.43																																																																																																																																																																																																																						
MN(um)	8.05																																																																																																																																																																																																																						
MA(um)	10.12																																																																																																																																																																																																																						
CS	5.93E-01																																																																																																																																																																																																																						
SD	3.48																																																																																																																																																																																																																						
Mz	11.04																																																																																																																																																																																																																						
en	3.73																																																																																																																																																																																																																						
Ski	0.2706																																																																																																																																																																																																																						
Kg	1.187																																																																																																																																																																																																																						
																																																																																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Size(um)</th> <th>%Chan</th> <th>% Pass</th> <th>Size(um)</th> <th>%Chan</th> <th>% Pass</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2000</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>5.50</td><td>1.57</td><td>2.43</td></tr> <tr><td>1674</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>4.62</td><td>0.65</td><td>0.86</td></tr> <tr><td>1408</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>3.89</td><td>0.21</td><td>0.21</td></tr> <tr><td>1184</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>3.27</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>995.5</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>2.750</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>837.1</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>2.312</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>703.9</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>1.944</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>591.9</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>1.635</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>497.8</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>1.375</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>418.6</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>1.156</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>352.0</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.972</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>296.0</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.817</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>248.9</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.687</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>209.3</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.578</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>176.0</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.486</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>148.0</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.409</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>124.4</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.344</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>104.6</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.2890</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>87.99</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.2430</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>73.99</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.2040</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>62.22</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.1720</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>52.32</td><td>0.00</td><td>100.00</td><td>0.1450</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>44.00</td><td>0.21</td><td>100.00</td><td>0.1220</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>37.00</td><td>0.47</td><td>99.79</td><td>0.1020</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>31.11</td><td>0.79</td><td>99.32</td><td>0.0860</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>26.16</td><td>1.51</td><td>96.53</td><td>0.0720</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>22.00</td><td>3.14</td><td>97.02</td><td>0.0610</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>18.50</td><td>6.63</td><td>93.88</td><td>0.0510</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>15.55</td><td>12.68</td><td>87.25</td><td>0.0430</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>13.08</td><td>19.57</td><td>74.57</td><td>0.0360</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>11.00</td><td>21.93</td><td>55.00</td><td>0.0300</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>9.25</td><td>17.18</td><td>33.07</td><td>0.02550</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>7.78</td><td>9.43</td><td>15.89</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6.54</td><td>4.03</td><td>6.46</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>						Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass	2000	0.00	100.00	5.50	1.57	2.43	1674	0.00	100.00	4.62	0.65	0.86	1408	0.00	100.00	3.89	0.21	0.21	1184	0.00	100.00	3.27	0.00	0.00	995.5	0.00	100.00	2.750	0.00	0.00	837.1	0.00	100.00	2.312	0.00	0.00	703.9	0.00	100.00	1.944	0.00	0.00	591.9	0.00	100.00	1.635	0.00	0.00	497.8	0.00	100.00	1.375	0.00	0.00	418.6	0.00	100.00	1.156	0.00	0.00	352.0	0.00	100.00	0.972	0.00	0.00	296.0	0.00	100.00	0.817	0.00	0.00	248.9	0.00	100.00	0.687	0.00	0.00	209.3	0.00	100.00	0.578	0.00	0.00	176.0	0.00	100.00	0.486	0.00	0.00	148.0	0.00	100.00	0.409	0.00	0.00	124.4	0.00	100.00	0.344	0.00	0.00	104.6	0.00	100.00	0.2890	0.00	0.00	87.99	0.00	100.00	0.2430	0.00	0.00	73.99	0.00	100.00	0.2040	0.00	0.00	62.22	0.00	100.00	0.1720	0.00	0.00	52.32	0.00	100.00	0.1450	0.00	0.00	44.00	0.21	100.00	0.1220	0.00	0.00	37.00	0.47	99.79	0.1020	0.00	0.00	31.11	0.79	99.32	0.0860	0.00	0.00	26.16	1.51	96.53	0.0720	0.00	0.00	22.00	3.14	97.02	0.0610	0.00	0.00	18.50	6.63	93.88	0.0510	0.00	0.00	15.55	12.68	87.25	0.0430	0.00	0.00	13.08	19.57	74.57	0.0360	0.00	0.00	11.00	21.93	55.00	0.0300	0.00	0.00	9.25	17.18	33.07	0.02550	0.00	0.00	7.78	9.43	15.89				6.54	4.03	6.46			
Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass																																																																																																																																																																																																																		
2000	0.00	100.00	5.50	1.57	2.43																																																																																																																																																																																																																		
1674	0.00	100.00	4.62	0.65	0.86																																																																																																																																																																																																																		
1408	0.00	100.00	3.89	0.21	0.21																																																																																																																																																																																																																		
1184	0.00	100.00	3.27	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
995.5	0.00	100.00	2.750	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
837.1	0.00	100.00	2.312	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
703.9	0.00	100.00	1.944	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
591.9	0.00	100.00	1.635	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
497.8	0.00	100.00	1.375	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
418.6	0.00	100.00	1.156	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
352.0	0.00	100.00	0.972	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
296.0	0.00	100.00	0.817	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
248.9	0.00	100.00	0.687	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
209.3	0.00	100.00	0.578	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
176.0	0.00	100.00	0.486	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
148.0	0.00	100.00	0.409	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
124.4	0.00	100.00	0.344	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
104.6	0.00	100.00	0.2890	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
87.99	0.00	100.00	0.2430	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
73.99	0.00	100.00	0.2040	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
62.22	0.00	100.00	0.1720	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
52.32	0.00	100.00	0.1450	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
44.00	0.21	100.00	0.1220	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
37.00	0.47	99.79	0.1020	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
31.11	0.79	99.32	0.0860	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
26.16	1.51	96.53	0.0720	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
22.00	3.14	97.02	0.0610	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
18.50	6.63	93.88	0.0510	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
15.55	12.68	87.25	0.0430	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
13.08	19.57	74.57	0.0360	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
11.00	21.93	55.00	0.0300	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
9.25	17.18	33.07	0.02550	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																		
7.78	9.43	15.89																																																																																																																																																																																																																					
6.54	4.03	6.46																																																																																																																																																																																																																					
Warnings: NONE																																																																																																																																																																																																																							