



**Universidad
Rey Juan Carlos**

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UNA BOQUILLA PARA UN EQUIPO DE PROYECCIÓN
TÉRMICA PARA DEPOSICIÓN DE MATERIALES DE BAJA DENSIDAD**

Arianna Maglia Valero

Director: Luis Alonso San José y Pedro Alberto Poza Gómez

Curso Académico 2023/24



Universidad
Rey Juan Carlos

Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

El presente trabajo, titulado *Diseño de una boquilla para un equipo de proyección térmica para deposición de materiales de baja densidad*, constituye la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo Fin de Grado que presenta *D^a. Arianna Maglia Valero* como parte de su formación para aspirar al Título de Graduado/a en Ingeniería Mecánica. Este trabajo ha sido realizado en la *Universidad Rey Juan Carlos* en el *Departamento de Tecnología Química, Energética y Mecánica* bajo la dirección de *Luis Alonso San José* y *Pedro Alberto Poza Gómez*.

Móstoles, 02 de marzo de 2024

ÍNDICE

1. RESUMEN	5
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PROYECCIÓN EN FRÍO	7
2.1.1. Ámbito histórico.....	7
2.1.2. Comparación de la proyección en frío con otras técnicas de proyección térmica a alta temperatura.....	8
2.2. MÉTODO DE DEPOSICIÓN	9
2.2.1. Influencia del tamaño de partícula y la velocidad de proyección.....	9
2.2.2. Mecanismo de adhesión	12
2.3. EQUIPOS DE PROYECCIÓN FRÍA COMERCIALES	14
2.3.1. Equipos de baja presión (LPCS).....	14
2.3.2. Equipos de alta presión (HPCS).....	14
2.5. APLICACIONES EN DIFERENTES SECTORES.....	15
3. OBJETIVOS	17
3.1. SELECCIÓN DE LA VENTANA DE DEPOSICIÓN PARA BAJA PRESIÓN	17
3.2. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA PARA PARTÍCULAS DE ALUMINIO.....	17
3.3. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA BOQUILLA.....	18
4. METODOLOGÍA Y CÁLCULOS	19
4.1. MODELOS DE CÁLCULO PARA LA SIMULACIÓN DEL ESTUDIO MEDIANTE MATLAB	19
4.1.1. Presentación teórica de los modelos implementados en el estudio	19
4.1.2. Nueva hipótesis asumida en la parte divergente de la boquilla	22
4.2. ESTUDIO DE PARÁMETROS DETERMINANTES EN LA VELOCIDAD DE SALIDA DE LA PARTÍCULA	26
4.2.1. Gas portador	26
4.2.2. Radio y velocidad inicial de la partícula en la garganta de la boquilla	26
4.2.3. Longitud de la parte divergente de la boquilla	30

4.2.4. Temperatura y presión de estancamiento	32
4.3. DISEÑO GEOMÉTRICO MEDIANTE MATLAB	37
4.3.1. Optimización y suavizado de la geometría divergente de la boquilla	37
4.3.2. Comparación entre el modelo simplificado (SM) y el modelo totalmente integrado (IM) .	39
4.3.3. La boquilla optimizada frente a la boquilla cónica clásica.....	42
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN/SOLUCIÓN TÉCNICA	44
5.1. CARACTERÍSTICAS DEL GAS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO	44
5.2. PERFIL DE GEOMETRÍAS ÓPTIMAS PARA DISTINTOS TAMAÑOS DE PARTÍCULA	47
5.3. CONTRASTE ENTRE LAS PÉRDIDAS DE VELOCIDAD DE SALIDA	49
5.4. MODELO DE LA GEOMETRÍA FINAL	53
5.5. DISCUSIÓN DE LOS MATERIALES COMPATIBLES CON LOS REQUERIMIENTOS EN USO DE LA BOQUILLA MEDIANTE GRANTA EDUPACK.....	55
5.5.1. Pautas de selección primarias	55
5.5.2. Procesos de fabricación industrial	58
5.5.3. Estimación del coste respecto al material y proceso de fabricación.....	60
5.5.4. Evaluación del impacto ambiental.....	62
6. CONCLUSIONES	64
7. BIBLIOGRAFÍA	65
8. APÉNDICES.....	68
APÉNDICE I: Datos adicionales en la variación del tamaño de partícula.....	68
APÉNDICE II: Procedimiento de modelado de la boquilla mediante Fusion 360.....	71
APÉNDICE III: Plano de despiece de la boquilla.....	74
APÉNDICE IV: Índices de rendimiento	75
APÉNDICE V: Esquemas procesos de fabricación	76
APÉNDICE VI: Part Cost Estimator.....	79
APÉNDICE VII: Presupuesto económico.....	80

1. RESUMEN

La proyección en frío, es una técnica relativamente reciente que se está implementando actualmente en numerosos sectores debido a la ausencia de la degradación de la composición inicial del polvo al no superar la temperatura de fusión del material proyectado, lo que la hace un método especialmente recomendable para la reparación de componentes dañados y la producción de recubrimientos libres de tensiones térmicas, oxidación y corrosión. Los equipos de proyección en frío cuentan con un gas portador que acelera las partículas pertenecientes al polvo con unas determinadas condiciones de estancamiento iniciales, cuyos valores dividen los sistemas en dos variantes, donde el equipo de baja presión (LPCS) trabaja a temperaturas y presiones menores que en los sistemas de alta presión (HPCS).

Numerosos estudios definen el rango de velocidad de salida de las partículas que debe alcanzarse si se desea una correcta adhesión entre las partículas proyectadas y el sustrato, junto con la formación continuada del recubrimiento durante el proceso. La velocidad crítica supone el límite inferior que debe superarse para generar una ganancia de material y lograr el crecimiento de la deposición, pero exceder un determinado valor conlleva la penetración de las partículas provocando erosión sobre el sustrato que define el límite superior conocido como velocidad de erosión.

La simulación del proceso isoentrópico unidimensional que guía el cálculo teórico de la proyección térmica pasa en este trabajo a una innovadora sistemática justificada en el método de los multiplicadores de Lagrange que consta de una restricción angular, convirtiendo la geometría de la boquilla en una curva suave. La consolidación de este método se llevará a cabo mediante el contraste con el utilizado regularmente para el diseño de boquillas cónicas comerciales, demostrando la maximización de la velocidad de salida de las partículas. La explicación teórica establece aquellas variables que inciden de manera fundamental sobre la geometría y la velocidad óptima, que con la ayuda de diagramas de contorno diseñados se facilita su evaluación, poniendo a disposición del usuario la ventana de deposición para la proyección de partículas de aluminio con un equipo de baja presión. Se demuestra el incremento de la velocidad de salida con el aumento de la longitud de la parte divergente de la boquilla, la temperatura y la presión de estancamiento hasta un cierto valor que será presentado posteriormente.

El tamaño de partícula y su densidad es claramente uno de los indicadores más importantes en las características de salida y el diseño de la geometría de la boquilla que optimiza la velocidad de la partícula. La obtención de diámetros de salida más amplios vendrá influenciada por partículas más pequeñas y ligeras. A su vez, se podrá observar la concentración de perfiles geométricos menos abiertos para dimensiones superiores de partículas, promoviendo el análisis del tamaño que más se ajusta a las propiedades impuestas y que supera la velocidad crítica.

Finalmente, el diseño del producto conlleva la recopilación de los materiales que soportan las condiciones de servicio de trabajo para la boquilla de proyección térmica, englobando una cierta

resistencia térmica y abrasiva, así como un límite elástico elevado y una buena estabilidad dimensional térmica. Por consiguiente, el impacto ambiental y económico para la fabricación de la boquilla debe considerarse junto con el mejor proceso de fabricación específico para los materiales cerámicos resultantes y su implementación en la industria.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PROYECCIÓN EN FRÍO

La proyección en frío (“Cold Spray”, CS) es una tecnología de proyección térmica que permite la deposición rápida de una gran variedad de materiales, principalmente metales, en estado sólido a temperaturas inferiores de sus respectivos puntos de fusión. De esta manera, se evitan cambios no deseados en la composición química o de fases de los materiales implicados [1], [2]. Es una técnica que emplea la energía cinética para acelerar micropartículas que se proyectan sobre un sustrato para lograr su unión, generando un recubrimiento [3].

2.1.1. Ámbito histórico

La reciente tecnología CS se desarrolló en la década de 1980 por el Dr. Anatolli Papyrin y otros investigadores en el Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada de la Academia Rusa de Ciencias (ITAM-RAS) en Novosibirsk [4], donde se llevaban a cabo experimentos en túneles de viento supersónicos para estudiar el comportamiento del flujo de gas con pequeñas partículas metálicas, que podían rastrearse mediante detección láser. Se observó que, al incrementar gradualmente la velocidad del flujo hasta cierto punto, actualmente conocido como velocidad crítica, de la cual se hablará más adelante, las partículas de material aceleradas a velocidades supersónicas se acumulaban rápidamente en la superficie del sustrato a recubrir, sin generar ningún tipo de erosión. Por el contrario, a velocidades inferiores se producía la aspersion de las partículas rebotando e incrustándose contra la superficie, produciéndose el desgaste del sustrato, como queda reflejado en la *Figura 1*. Los investigadores denominaron a esta nueva técnica de recubrimiento como “Método de pulverización dinámica de gas frío” [1].

Tras estos descubrimientos, se desarrolló un prototipo que empleaba una boquilla supersónica convergente-divergente con un gas de bajo peso molecular, como el helio puro o mezclado con nitrógeno y aire. Este sistema inicial permitió la deposición de una amplia variedad de metales, aleaciones metálicas y algunos materiales compuestos.

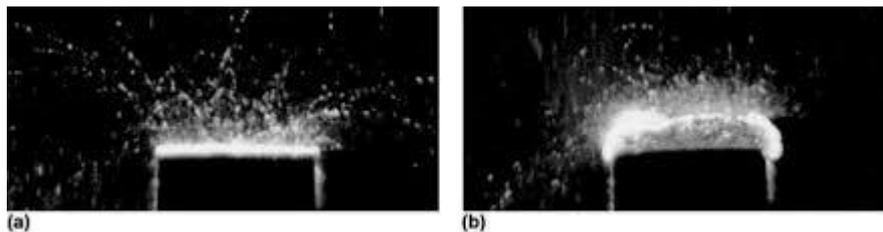


Figura 1. Experimentos de Anatolli Papyrin que muestran que: (a) a una velocidad de impacto de 250 m/s, las partículas no se adhieren, pero (b) a 900 m/s se forma una capa rápidamente [1].

2.1.2. Comparación de la proyección en frío con otras técnicas de proyección térmica a alta temperatura

Las temperaturas más bajas de la proyección en frío permiten menores cantidades de calor en el sustrato al no utilizar una fuente de energía térmica elevada que funda el material de alimentación, tales como la llama o el plasma. Esta característica impide la degradación del polvo térmicamente sensible, bien sea a través de la oxidación u otras reacciones químicas, incluso en contacto con el aire [1]. De manera que, la proyección en frío es una técnica deseable para proyectar materiales sensibles al oxígeno, como el cobre o el titanio, y los recubrimientos resultantes se caracterizan por una mínima porosidad, proporción de óxido, elevada adherencia, alta homogeneidad y dureza.

Asimismo, la tecnología CS ofrece el desarrollo de recubrimientos gruesos sin deslaminación ni agrietamiento, que resulta interesante para fines de reparación [5], [6]. También, cuenta con la generación de piezas independientes, a partir de materiales nanofásicos, intermetálicos o amorfos, que conduce al desarrollo de esta técnica en el sector de la fabricación aditiva, donde estos materiales suelen ser difíciles de proyectar utilizando técnicas convencionales [7].

Una de las ventajas de la proyección en frío es que evita el crecimiento del grano y la formación de fases indeseables, conservando la composición inicial del polvo [5]. Además, previene la segregación química (macro y microsegregación) que puede generarse durante la solidificación con técnicas convencionales. Por otro lado, se produce la eliminación de las tensiones de tracción residuales producidas durante la contracción por solidificación. Es más, se ha demostrado que el resultado de la deformación que generan las partículas en estado sólido al impactar contra el sustrato a recubrir puede ocasionar tensiones residuales de compresión beneficiosas.

Por otro lado, la proyección en frío proporciona ventajas ecológicas para la deposición de materiales como el cobre y polímeros, que ofrece una alternativa rentable a tecnologías tales como galvanoplastia, pintura y soldadura.

Una de las limitaciones más importantes en el proceso de proyección en frío, es que las ondas solo pueden viajar en una trayectoria visual directa, es decir, en línea recta desde la fuente hasta el sustrato sin obstáculos [7]. Otro inconveniente es la limitada gama de materiales que se pueden depositar, ya que se requiere que tanto las partículas como los sustratos posean una ductilidad mínima para que los recubrimientos se adhieran correctamente. Luego, la deposición viene determinada por la deformación plástica de las partículas y el material a proyectar, lo que restringe la capacidad para depositar partículas cerámicas mediante esta técnica, siendo posible la utilización de mezclas metal-cerámica [6]. No obstante, la ausencia de tensiones térmicas en la intercara aumenta la amplitud del método de proyección en frío en contraposición con las técnicas convencionales [7], [8].

2.2. MÉTODO DE DEPOSICIÓN

El sistema de la pistola pulverizadora está formado principalmente por varios puertos para el suministro de gas, que suele ser aire, nitrógeno o helio, y partículas de polvo del material a proyectar, que viajarán a través de una boquilla convergente-divergente, conocida como De' Laval [4], [5]. Generalmente, se pueden observar dos corrientes del gas portador, una parte mayoritaria que se calienta y otra menor que permanece fría, que posteriormente arrastra las partículas del material a depositar desde el alimentador hacia la boquilla, donde ambos flujos se combinan [6].

Las partículas de polvo sufren un incremento de la velocidad junto con el gas portador, que ocasiona velocidades supersónicas a la salida de la boquilla, y por consiguiente su significativa deformación plástica al impactar contra el sustrato iniciando el proceso de recubrimiento. Las partículas se depositan en estado sólido incrustándose en la superficie y permiten el desarrollo de una capa mediante el apilamiento del material pulverizado [9].

2.2.1. Influencia del tamaño de partícula y la velocidad de proyección

Al estudiar las condiciones de deposición, se determinó que la velocidad de impacto de la partícula para lograr la unión con el sustrato debe encontrarse dentro de ciertos límites superior e inferior, que describen los límites de erosión y no adherencia, respectivamente [7], [10].

Una correcta adhesión mediante la técnica CS implica que la velocidad de proyección debe ser superior a un valor mínimo, conocido como velocidad crítica (v_{cr}), para alcanzar una inestabilidad de corte hidrodinámica en la interfaz de unión y una ganancia de material. Se define la velocidad crítica como el límite inicial a partir del cual aumenta la eficiencia de deposición y se logra el crecimiento del recubrimiento [2], [6]. No obstante, si la velocidad de impacto se encuentra por debajo de este mínimo, las partículas rebotarán y desgastarán el sustrato, o se quedarán incrustadas en la superficie sin una adhesión firme [1].

Al contrario, si la velocidad de proyección se aumenta bastante por encima de la crítica, se manifiesta una transición a la penetración hidrodinámica, donde las partículas generarán una fuerte erosión durante el impacto, dando lugar al límite máximo denominado velocidad de erosión ($v_{erosión}$), que no debe ser excedido. Esta situación también puede estar provocada por inestabilidades de corte bajo cargas ultra altas. Asimismo, este rango puede alcanzarse con plomo, estaño, oro, plata, zinc y, en condiciones de proyección extremas, con cobre [11].

La velocidad de impacto depende del gas portador, las dimensiones geométricas de la parte divergente de la boquilla y las propiedades mecánicas de las partículas proyectadas, así como su tamaño, densidad y temperatura. Por consiguiente, se demostró que la geometría de la parte convergente de la boquilla no

es una característica significativa, ya que la velocidad de salida de las partículas no se ve afectada por la velocidad en la garganta de la boquilla por tener un número de Mach igual a 1 en ese punto (flujo transónico) [12].

La variación de la velocidad crítica (v_{cr}) y la velocidad de erosión ($v_{erosión}$) respecto a la temperatura de impacto de las partículas queda representada en el diagrama esquemático de la *Figura 2*. Se puede observar que el área por debajo de la curva de la v_{cr} indica una falta de adherencia o ligera erosión. Por otro lado, la superficie por encima de la $v_{erosión}$ implica una elevada erosión o, en el caso de partículas blandas que impactan contra un sustrato duro, ninguna deposición. Ambas situaciones se encuentran separadas por una línea discontinua.

La región entre ambas curvas define la ventana de capacidad de proyección (“Window of Sprayability”, WS), que también se halla limitada por una zona de comportamiento frágil a la izquierda del diagrama y a temperaturas más altas, una mayor ductilidad del material. Las características sobre la velocidad de las partículas y sus distribuciones de temperatura quedan recogidas en PIC (“Particle Impact Conditions”) para unos determinados parámetros de proyección especificados. De manera que, para optimizar la proyección en frío a su máximo y que se produzca la adherencia del recubrimiento, se busca ajustar el marco de las condiciones óptimas de impacto de las partículas (“Particle Impact Conditions”, PIC) para una superposición completa con el área WS. A su vez, hay un límite para temperaturas muy bajas, donde el material se vuelve quebradizo, por ejemplo, el estaño que se transforma a una fase de diamante cúbico frágil por debajo de los 13°C.

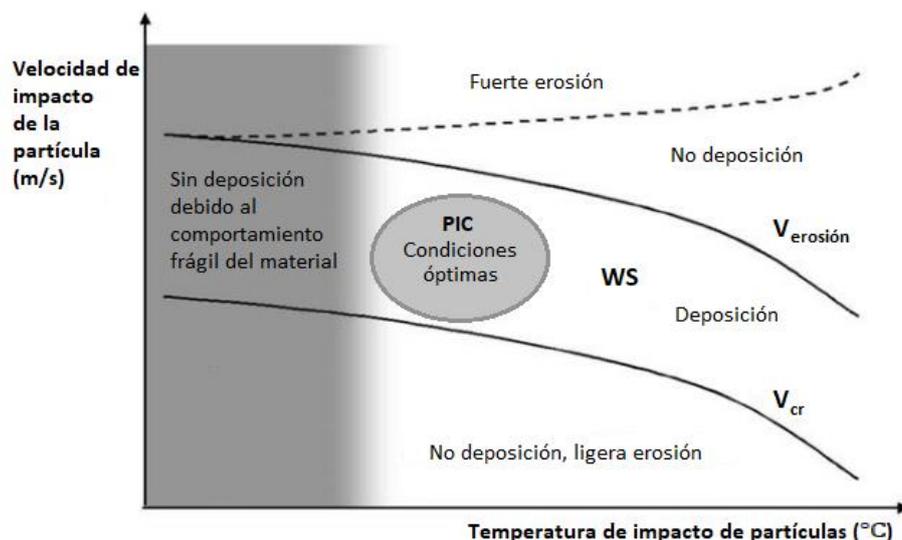


Figura 2. Esquema de la velocidad de impacto de la partícula frente a su temperatura con ventana de proyección (WS) y régimen de condiciones óptimas de impacto de partículas (PIC) [11].

A continuación, se estudia la dependencia de la velocidad crítica respecto al tamaño de las partículas mediante el esquema de la *Figura 3*. La mayoría de los materiales tendrá un rango de tamaño óptimo, donde la velocidad de impacto (v_{impacto}) es considerablemente mayor que la velocidad crítica (v_{cr}), haciendo referencia a la zona central del diagrama.

En cambio, la zona de la izquierda indica una unión insuficiente o una nula deposición, y a la derecha del esquema, se puede observar que la velocidad crítica y la de impacto son prácticamente paralelas, señalando un amplio rango en el que los recubrimientos muestran cierta adherencia, pero con una mayor porosidad, tamaños de partículas superiores y una eficiencia de deposición (DE) reducida [11].

Los resultados obtenidos por T. Schmidt et al. [11] exponen que las velocidades críticas disminuyen al aumentar el tamaño de las partículas, a causa de los efectos de la conducción de calor o del endurecimiento por velocidad de deformación.

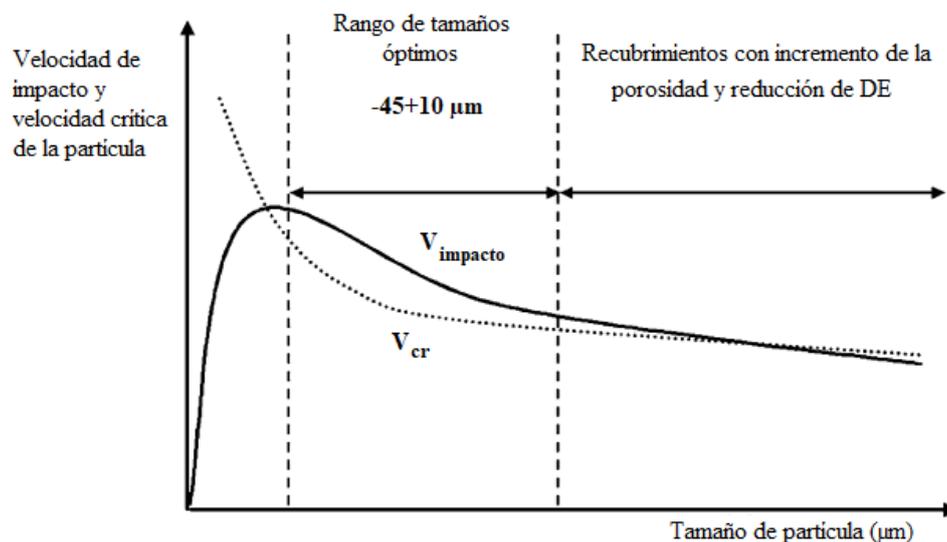


Figura 3. Distribución óptima del tamaño de partículas respecto a la velocidad de impacto y velocidad crítica para proyección en frío [11].

De forma que, se analizó la obtención de diámetros de salida más grandes y diseños más abiertos a diámetros de partículas constantes, cuanto más ligeras son las partículas y menor es su tamaño. Otro aspecto importante es la mayor variación de los diámetros de salida al ir modificando el tamaño de partícula en materiales con menor densidad, como ocurre con el aluminio.

Basándose en estas características se puede establecer una fuerte correlación entre la geometría óptima de la boquilla y la granulometría y material de la partícula seleccionada. Entonces, para alcanzar una velocidad óptima de salida es aceptable exponer la necesidad de una forma de boquilla única para cada diámetro de partícula, material y parámetros de estancamiento [12].

2.2.2. Mecanismo de adhesión

Los procedimientos por los cuales las partículas en estado sólido se deforman y se unen están caracterizados por elevadas tasas de deformación plástica durante el impacto. La teoría más difundida para explicar el enlace producido por la técnica CS es el mecanismo de inestabilidad de corte adiabática (“Adiabatic Shear Instability”, ASI), que combina el endurecimiento por deformación con el ablandamiento térmico ocasionado por el calor liberado en la interfaz partícula-sustrato, a causa de una velocidad superior a la crítica (v_{cr}) durante la colisión contra la superficie. Como resultado, se producen tensiones cortantes localizadas y una condición de “inestabilidad de corte adiabática” [13].

De manera que, en la evolución del impacto se puede observar que al penetrar la partícula en el sustrato se genera un cráter, cuya profundidad y diámetro van aumentando. Al mismo tiempo, la partícula se aplana y la relación entre la altura y el ancho disminuye. Por consiguiente, la deformación plástica se produce en una zona delgada próxima a la interfaz partícula-sustrato, cuyo valor máximo se concentra en el borde de la superficie de contacto, donde se desarrolla un chorro de material altamente deformado a causa de la extrusión de material desde la interfaz, denominado “jetting”. El proceso interno de unión está determinado por el entrelazamiento mecánico, que implica el acoplamiento geométrico de las partículas, y la unión metalúrgica, que se produce mediante reacciones químicas o la difusión en las interfaces entre las distintas partículas y con el sustrato.

La propuesta del mecanismo ASI se originó justificándose en simulaciones de elementos finitos y sus posteriores investigaciones se llevaron a cabo desde la misma perspectiva, careciendo de una evidencia empírica o experimental que la respalde rigurosamente.

En cambio, Hassani et al. [14] sugieren una plasticidad hidrodinámica en la unión basada en la interacción entre fuertes ondas de presión con el sustrato libre en los bordes de las partículas, como un resultado dinámico natural de un impacto lo bastante rápido, sin el requerimiento de una inestabilidad de corte adiabática. Inicialmente, en el primer contacto se constituye un estado de materia altamente comprimido que abarca una región muy pequeña desde el centro del impacto hasta el borde del contacto, unido al frente de choque, que se irá expandiendo a medida que se aplana la partícula. El paso del tiempo provoca una disminución de la velocidad del borde de contacto, en un principio superior a la velocidad de la onda de choque, que se traduce en el desprendimiento de ondas de presión respecto al borde de la partícula y la presencia de una zona de alta presión adyacente a la superficie libre, donde la presión es nula. Esta situación genera un gradiente de presión considerablemente grande en las proximidades del sustrato libre, que acelera el material liberando la presión y originando un pequeño “labio” incipiente (jetting) bajo una tensión localizada. Por otro lado, la interacción del movimiento entre la superficie libre y las ondas de presión en direcciones opuestas, promueve que éstas últimas alcancen el área superior de la partícula, liberándose y exponiendo una zona más grande a una tensión relativamente mayor durante menos de un nanosegundo y la desaceleración de la parte superior de la partícula.

Los modelos que predicen el comportamiento frente a la deformación de materiales dúctiles a altas velocidades son complejos y suelen confirmarse mediante datos experimentales, para su utilización en simulaciones de elementos finitos, es decir, para la evaluación del enlace a través de métodos computacionales. El modelo de plasticidad de Johnson-Cook (JC) es uno de los más conocidos e implementados, ya que valora los efectos del endurecimiento por deformación, la alta velocidad y el ablandamiento térmico. Sin embargo, se encuentran fallos en las predicciones de tensión a velocidades de deformación superiores de $10^4 \mu\epsilon/s$, siendo el modelo JC inadecuado para la proyección térmica. Como solución surge el modelo de Preston-Tonks-Wallace (PTW), cuya predicción general de la tensión de flujo es considerablemente más cercana que la de modelos puramente empíricos como el de Johnson-Cook. El modelo de materiales de base física PTW es inherentemente más complejo porque se fundamenta en la termodinámica y no en un modelo constitutivo de ajuste de curvas (modelo JC), siendo capaz de prever tensiones de fluencia a velocidades de deformación dentro del rango de 10^{-3} y 10^{12} 1/s. A su vez, está basado en tres variables adimensionales relacionadas con la tensión de fluencia, la temperatura y la tasa de deformación [15], [16].

Una vez se alcanza la adhesión en la interfaz del sustrato y la primera capa de partículas, se procede a la proyección de capas consecutivas mediante las interacciones entre partículas y la reducción de huecos, que dan lugar a recubrimientos gruesos [17].

Cabe destacar que, la ductilidad de los materiales de las partículas y el sustrato determina la deformación que experimentan cada uno de ellos. Por lo que, cuando el polvo es más duro que el sustrato se produce la incrustación de las partículas que pueden llegar a aplanarse, mientras que el sustrato sufre una mayor deformación por resistencia a la cavitación y una posible área de inestabilidad cortante más pequeña. En el caso contrario, cuando el sustrato es más duro, el material proyectado más blando se deforma y se ocasiona un enlace con baja fuerza adhesiva. Asimismo, si ambos poseen una resistencia similar, las partículas se aplanan y se adquiere un acoplamiento más profundo con altos grados de deformación para ambos, generando una buena unión [6], [13], [17].

Parece aceptable exponer que la deformación plástica puede producir la rotura de películas superficiales delgadas, como los óxidos, y establecer un contacto íntimo bajo la aplicación de una alta presión local, promoviendo así la unión entre partículas y sustrato [5], [7], [13], [17], [18]. La creación del fenómeno de “jetting” (necesario para la generación de enlaces) elimina los fragmentos de óxidos rotos y facilita la unión metalúrgica. Además, se averiguó que a medida que se aumentaba el espesor de la capa de óxido, la deformación de las partículas y la formación del chorro de material se limitaba, así como el requerimiento de una velocidad crítica superior para su rotura [17], [19].

En cualquier caso, será imprescindible la formación del “jetting” para que se produzca la adhesión por CS. Y tanto las propiedades térmicas como las mecánicas de la superficie del sustrato y el material en polvo son importantes en el mecanismo de unión.

2.3. EQUIPOS DE PROYECCIÓN FRÍA COMERCIALES

Los equipos comerciales están distribuidos en dos categorías fundamentales. En primer lugar, existen los equipos de baja presión (“Low-Pressure Cold Spray”, LPCS) cuya presión máxima es de 12 bar y su rango de operación se halla entre 20 y 650 °C. Y en segundo lugar, se encuentran los equipos de alta presión (“High-Pressure Cold Spray”, HPCS) que trabajan a un máximo de hasta 60 bar y a una temperatura de 300 a 1100 °C [2]. El proceso LPCS tiene en común numerosas características con el HPCS, pero también cuentan con algunas disimilitudes importantes.

2.3.1. Equipos de baja presión (LPCS)

En este caso, inicialmente la pistola es alimentada en la zona de entrada con un gas portador presurizado procedente normalmente de un equipo portátil, que se calentará hasta la temperatura solicitada. De manera que, la inyección del polvo se realizará en la garganta de la boquilla convergente-divergente, donde la presión del gas es lo suficientemente baja para admitir la liberación de las partículas desde el alimentador a la presión atmosférica [20]. Este procedimiento recibe el nombre de equipo de aguas abajo representado en la *Figura 4 (a)*.

El sistema de baja presión posee una complejidad y un coste inferior, debido a que la inyección del polvo se produce aguas abajo de la garganta y las presiones necesarias en esta sección son más bajas que a la entrada de la boquilla. Sin embargo, esto ocasiona que las velocidades de las partículas obtenidas sean reducidas, estando normalmente por debajo de 700 m/s, y que la gama de materiales a depositar sea más limitada. Por consiguiente, el equipo LPCS será portátil, económico, compacto y flexible, lo cual lo hace adecuado para la restauración de piezas dañadas a base de aluminio, cobre o zinc [1], [6], [20].

2.3.2. Equipos de alta presión (HPCS)

El equipo HPCS consta de dos corrientes de gas individuales al comienzo del sistema, que serán el gas propulsor, aquel presurizado y calentado con los requerimientos de la proyección, y el gas portador, que se mezclará con las partículas de polvo del material seleccionado al atravesar el alimentador, como queda indicado en el esquema de la *Figura 4 (b)*. A continuación, previamente a la entrada de la boquilla De’ Laval, se produce la unión de los dos flujos de gas. Cabe destacar que, para garantizar una correcta inyección de las partículas, la presión del gas propulsor debe ser ligeramente menor que la del gas portador para evitar el retroceso del polvo [20]. Luego, el sistema adquiere la designación de aguas arriba [9], [21].

Los equipos HPCS suelen ser caros y de grandes dimensiones al necesitar un rango de presiones más altas. Por otra parte, puede aparecer una complicación importante relacionada con la obstrucción de la boquilla, que empeora al aumentar la velocidad, dureza y temperatura de las partículas. Para mejorar este problema, es necesaria la mezcla de un conjunto de partículas de mayor diámetro o límite elástico con el polvo inicial, ya que si no se producirá un desgaste severo en la garganta de la boquilla y ocasionará una deposición ineficiente.

Sin embargo, las velocidades de las partículas son elevadas en comparación con LPCS al ser arrastradas por un periodo de tiempo más prolongado y trabajar con rangos superiores de presión y temperatura, alcanzando incluso máximos de 1200 m/s para una amplia gama de materiales [1], [6], [20], [21].

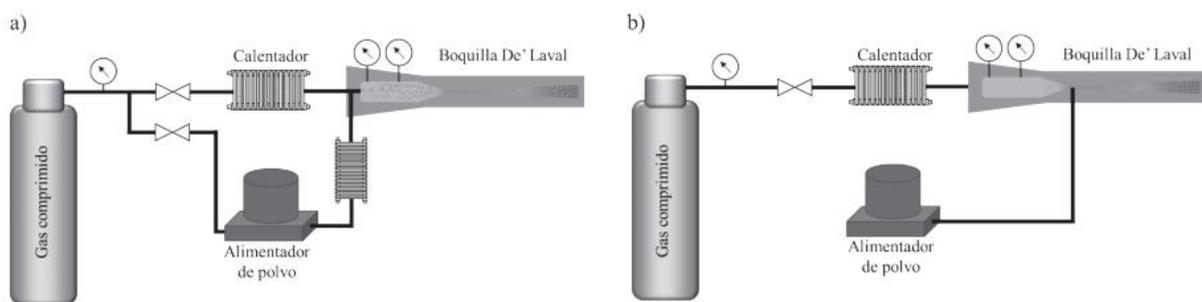


Figura 4. Diagrama esquemático del sistema de proyección en frío (a) de baja presión (LPCS) y (b) de alta presión (HPCS) [4].

2.5. APLICACIONES EN DIFERENTES SECTORES

La proyección en frío se ha empleado como técnica de recubrimiento en una amplia variedad de industrias, entre ellas la automotriz, aeroespacial, naval, energética, biomédica y otras. Los sustratos pulverizados pueden adquirir una elevada protección frente a las altas temperaturas, la erosión, la corrosión, la oxidación y las sustancias químicas [20], [22]. Actualmente, el sistema de proyección en frío se emplea principalmente para incrementar el valor añadido de los productos en numerosas industrias, debido a que mejora su funcionalidad y rendimiento.

La protección contra la corrosión es una de las principales aplicaciones de la proyección en frío, ya que los recubrimientos evitan que el medio ambiente ejerza una influencia negativa sobre las características a preservar de los materiales, convirtiéndose en una forma eficaz de protección y prevención frente a la corrosión. Los recubrimientos de zinc y aluminio sobre acero actúan como barrera contra sustancias agresivas en multitud de estructuras como tuberías, puentes, barcos y tanques sometidos al agua del mar, y a atmósferas húmedas en plataformas y puertos marítimos.

Las investigaciones con mayor inversión económica se encuentran dentro de la industria aeronáutica, donde se depositan numerosos recubrimientos cerámicos y metálicos para mejorar las propiedades tribológicas y la resistencia al desgaste en distintos componentes, reduciendo la porosidad del sustrato hasta a un 1%. Además, también destaca la reparación y restauración dimensional, ya que la técnica CS reduce considerablemente el coste al devolver los componentes a su condición en servicio, sin necesidad de reemplazarlos por otros nuevos. Por ejemplo, se reparó con éxito la carcasa de la caja de transmisión de flaps de aviones empleando un recubrimiento de aluminio sobre una fundición de magnesio y Silvello et al. [23] demostraron que la reparación por proyección en frío de componentes agrietados aumenta su ciclo de vida. En conclusión, se determinó un incremento de la resistencia a la corrosión, la dureza y la ductilidad local frente a una reducción de la porosidad.

Dentro de los sectores energéticos, se está produciendo un gran crecimiento en nuevos campos, en particular en las centrales térmicas, donde se trabajan en ambientes extremos con cloruros y sulfatos, siendo indispensable la generación de recubrimientos para prolongar la vida útil de distintos equipos, como los tubos del sobrecalentador, mejorando la corrosión a alta temperatura y la evasión de averías ocasionadas por la erosión. Asimismo, la técnica CS se utiliza para la reparación de superficies húmedas en plantas de energía nuclear susceptibles a agrietamiento por corrosión bajo tensión con partículas de aleaciones de hierro y níquel, ya que proporciona una alta fuerza de adhesión, elevada dureza, retención de las propiedades del polvo inyectado y no se genera una zona afectada por el calor (“Heat Affected Zone”, HAZ).

La proyección en frío también ofrece ventajas en la fabricación de objetos tridimensionales por capas, tecnología conocida como fabricación aditiva o impresión 3D. Debido a que no se generan tensiones residuales de tracción, se permite un tamaño más amplio de los productos, los tiempos de producción son más cortos y posee una alta flexibilidad para la reparación de componentes dañados, a diferencia de las piezas creadas por otras tecnologías de fabricación aditiva como fusión por haz de láser (“Laser beam machining”, LBM), fusión por haz de electrones (“Electron Beam Machining”, EBM) o deposición de metal por láser (“Laser Metal Deposition”, LMD). Principalmente, se utiliza en metales de alta reflectividad tales como el aluminio y el cobre, para fabricar piezas con simetría rotacional, pudiendo fabricarse piezas multi-materiales al no producirse fusión y permitiendo la deposición de capas de distintos materiales. Sin embargo, una de las principales desventajas de esta técnica es el acabado superficial rugoso que requiere un postmecanizado o la aplicación de tratamientos térmicos. Hasta ahora, se han reportado numerosas investigaciones y aplicaciones, particularmente en el sector aeroespacial, aunque continúa siendo una tecnología en desarrollo [5], [20].

Se espera que la proyección en frío se consolide como alternativa para la generación de piezas individuales y recubrimientos, lo que permita un incremento en el mercado de las industrias aeroespacial, electrónica, automotriz y sanitaria [4].

3. OBJETIVOS

La finalidad principal de este trabajo es el diseño de una boquilla de proyección fría optimizando la velocidad de salida de las partículas, utilizando aluminio como polvo a proyectar para generar un recubrimiento, se definirá la geometría óptima y se seleccionarán los materiales más adecuados para su fabricación. El aluminio presenta una gran versatilidad en las condiciones de deposición, por ser extremadamente ligero, blando, maleable, resistente a la corrosión y estable. Lo que lo hace perfecto para generar una adherencia exitosa y una aceleración óptima para superar la velocidad crítica.

3.1. SELECCIÓN DE LA VENTANA DE DEPOSICIÓN PARA BAJA PRESIÓN

El perfil geométrico de la boquilla conlleva la influencia de numerosos parámetros definidos por el usuario que afectan a las características finales de proyección. El uso de una ventana de deposición proporciona un enfoque integral para la deposición de polvos de aluminio mediante un equipo LPCS, a partir del nuevo modelo analítico de estudio en este trabajo.

La ventana de deposición contribuye al análisis de la velocidad de salida de las partículas de un modo más sencillo mediante diagramas de contorno, que incluyen la longitud de la parte divergente, la temperatura de estancamiento, la presión de estancamiento, el ángulo de restricción, el radio y la velocidad en la garganta de la boquilla.

3.2. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA PARA PARTÍCULAS DE ALUMINIO

La comparación entre el modelo unidimensional isoentrópico completamente integrado (“Integrated Model”, IM), utilizado hasta ahora, y la nueva metodología basada en el método de los multiplicadores de Lagrange, permite resaltar las ventajas de ésta última y su contribución a maximizar la velocidad final de la partícula al salir de la boquilla, utilizando MATLAB.

El diámetro de partícula de aluminio influye de manera notable sobre la geometría final y el perfil de velocidad, por ello se precisa un estudio en profundidad para un rango de 5 a 50 μm . Dado que, la obtención de resultados óptimos en términos de velocidad se encuentra relacionada con la elaboración de una forma de boquilla única para cada material, tamaño de partícula y condiciones iniciales de estancamiento.

Una vez se haya completado el procedimiento de desarrollo, se procederá al diseño tridimensional de la boquilla para una mejor visualización.

3.3. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA BOQUILLA

El seguimiento orientado a la posterior producción de la forma geométrica de la boquilla desarrollada, incluye la selección del material y el proceso de producción que perfeccione la resistencia de la boquilla frente a las condiciones de trabajo a las que esté sometida. Se realizará una clasificación de los materiales que incorpora el software Ansys Granta Edupack, basándose en la oxidación, la temperatura máxima de servicio, la erosión interior que causa el movimiento de las partículas, el límite elástico y la estabilidad dimensional térmica.

Una estimación económica del material individual y del proceso completo, así como la observación del impacto medioambiental son aspectos clave en la elección del material definitivo para la boquilla de proyección en frío.

4. METODOLOGÍA Y CÁLCULOS

4.1. MODELOS DE CÁLCULO PARA LA SIMULACIÓN DEL ESTUDIO MEDIANTE MATLAB

Se introducirán los modelos analíticos que permiten predecir las propiedades del flujo de gas y la velocidad de las partículas a lo largo de la boquilla, considerando casos opuestos para cada uno de ellos, en relación al comportamiento de ciertos parámetros tales como el coeficiente de arrastre (C_D), la velocidad, la densidad y la temperatura del gas.

Luego, se desarrollará una nueva metodología para garantizar la máxima velocidad de salida de las partículas mediante la optimización de la geometría divergente de la boquilla.

4.1.1. Presentación teórica de los modelos implementados en el estudio

Dykhuzen y Smith [7] desarrollaron un modelo, que asume un flujo de gas isoentrópico unidimensional (adiabático y sin fricción) aproximado a un gas ideal con calores específicos constantes. El modelo isoentrópico 1D es una herramienta adecuada para valorar de manera aproximada las propiedades del flujo de gas en el interior de la tobera, a pesar de la deficiencia de precisión al no considerar el efecto de la presión ambiente, el flujo supersónico exterior y las pequeñas capas límite del gas a lo largo de las paredes, donde viaja más lento. Además, el modelo isoentrópico da lugar a importantes errores cuando la presión de estancamiento es baja, es decir, cuando se trabaja con equipos de baja presión [24].

En primer lugar, siendo conocida la geometría de la boquilla, se puede determinar el número de Mach en cada coordenada axial, ya que la ecuación (1) establece una relación con el área de una sección transversal determinada (A) y el área de la sección transversal de la garganta (A^*) considerando la proporción entre calores específicos del gas (γ).

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

El número de Mach (M) es un factor determinante en los valores de estado del gas, es decir, la presión, temperatura, densidad y velocidad del gas, obtenidos mediante las siguientes relaciones isoentrópicas [(2) – (5)].

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

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (3)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (4)$$

Donde P , T y ρ son la presión, la temperatura y la densidad del gas, respectivamente. Asimismo P_0 , T_0 y ρ_0 , son la presión, la temperatura y la densidad de estancamiento, respectivamente. Cabe destacar que, todos los valores de estancamiento mencionados hacen referencia a aquellos que son inicialmente impuestos por el equipo de proyección en frío, siendo la velocidad del gas nula.

$$v = M \sqrt{\gamma R T} \quad (5)$$

Donde R es la constante universal de los gases ideales, que combina la presión, la densidad y la temperatura en la ecuación (6).

$$P = \rho R T \quad (6)$$

La idoneidad del proceso de proyección en frío no viene determinada por las condiciones del gas, sino por la velocidad de las partículas aceleradas. Sólo actuará la fuerza de arrastre impulsada por el fluido, dado que se puede considerar el flujo de partículas lo bastante diluido para que se cumplan las ecuaciones anteriores. La segunda ley de Newton establece el movimiento y la transferencia de las partículas inmersas en un fluido, y constituye el principio de conservación de la masa y la primera ley de la termodinámica [25]. Por lo que, se define una ecuación diferencial a partir de la segunda ley de Newton, junto con la hipótesis descrita, para hallar la velocidad de la partícula a lo largo de la boquilla.

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{C_D \rho A_p}{2} (v - v_p)^2 \quad (7)$$

Donde m_p , C_D , A_p , v , ρ y v_p son la masa media de la partícula, el coeficiente de arrastre, el área media proyectada por el polvo, la velocidad del gas, la densidad del gas y la velocidad de la partícula, respectivamente. La regla de la cadena permite expresar la ecuación (7) en función de la coordenada axial de la boquilla, x .

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{dv_p}{dx} v_p \quad (8)$$

El modelo simplificado (“Simplified Model”, SM) hace referencia a la resolución bajo fuertes suposiciones asumiendo el coeficiente de arrastre (C_D), la velocidad, la densidad y la temperatura del gas constantes, permitiendo la integración de la ecuación (7) y dando lugar a la ecuación (9) simplificada [7], [26].

$$\log\left(\frac{v - v_p}{v}\right) + \frac{v}{v - v_p} - 1 = \frac{C_D A_p \rho}{2m_p} x \quad (9)$$

Esta última expresión otorga una relación tácita con la posición de la partícula y permite una aproximación de la velocidad de la partícula en determinados puntos. Sin embargo, al proponerse sobre la base de numerosas suposiciones, puede no ser válida para una predicción exacta, por lo que no se ha utilizado ampliamente hasta ahora [24].

No obstante, Clift et al. [25] exponen un enfoque más realista al considerar el coeficiente de arrastre (C_D) dependiente del número de Reynolds relativo (Re_p), dejando de emplearse como una constante. De forma que, se utilizará la correlación que proporcionaron, válida para fluidos compresibles e incompresibles.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 e 4 Re_p^{-1,16}} \quad (3)$$

A continuación, se define el número de Reynolds relativo:

$$Re_p = \frac{\rho d_p (v - v_p)}{\mu} \quad (4)$$

Donde d_p es el diámetro medio de la partícula y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Se han demostrado diferencias de un orden de magnitud de μ durante una proyección en frío desde 473 a 1373 K, que establece la ley de Sutherland para predecir la variación de la viscosidad dinámica con la temperatura.

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C_s}{T + C_s} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Donde C_s y μ_0 son la constante de Sutherland y la viscosidad dinámica de referencia para un gas a una determinada temperatura T_0 , respectivamente. Por otro lado, el estudio de la variabilidad de μ con la presión no ha sido ampliamente analizada. No obstante, se definió un rango general de presiones en el que la viscosidad dinámica no se ve afectada. En el caso de la proyección en frío, se especifica la independencia de la viscosidad dinámica en el rango típico de uso, entre 1 y 70 bar.

Por consiguiente, el otro enfoque propuesto es el modelo integrado total (“Integrated Model”, IM) que incluye las variaciones que SM no tiene en consideración. El procedimiento a seguir es la integración numérica de la ecuación (7) y su evaluación en base a la velocidad, la densidad, la temperatura, el coeficiente de arrastre (C_D) y la viscosidad dinámica (μ) del gas que varían según el número de Mach y, por tanto, según la posición longitudinal de la boquilla [12].

4.1.2. Nueva hipótesis asumida en la parte divergente de la boquilla

El método de los multiplicadores de Lagrange se presenta junto con una novedosa metodología en la que el usuario es capaz de definir unas condiciones de forma, para concluir la geometría óptima de la parte divergente de la boquilla que maximiza la aceleración de la partícula.

La fuerza de arrastre (F_D) que actúa sobre la partícula especifica la función objetivo en cada etapa de la integración espacial, que coincide con la parte derecha de la ecuación (7) tras sustituir la ecuación (5) proporcionando una expresión en términos únicamente de dos variables independientes, v_p y M .

$$F_D = \frac{C_D \rho A_p}{2} (M\sqrt{\gamma RT} - v_p)^2 \quad (13)$$

El número de Mach que optimiza la F_D también debe calcularse para cada paso de la integración numérica del modelo IM, suponiendo que la velocidad de la partícula se mantiene constante para establecer el máximo de la ecuación (13). Además, se procede a resolver la ecuación (7) en base a las condiciones iniciales de la garganta ya conocidas, comprendiendo las características de la parte convergente.

Una vez se concluye la integración, existirá una velocidad de la partícula y un número de Mach óptimo para cada coordenada axial de la parte divergente, que permitirá solucionar la ecuación (1) para conseguir la geometría óptima de la boquilla.

$$\nabla F_D = \lambda \nabla g \quad (14)$$

$$\nabla F_D = \left(\frac{\partial F_D}{\partial v_p}, \frac{\partial F_D}{\partial M} \right) \quad (15)$$

$$g = v_p - k \quad (16)$$

Donde λ , k , y g son el multiplicador de Lagrange, la restricción del problema y la velocidad de la partícula en cada etapa de la integración, respectivamente. Tras el desarrollo de estas expresiones, se obtiene un sistema de ecuaciones con tres incógnitas, las cuales son λ , v_p y M .

$$\frac{A_p \rho}{2} \left[\frac{dC_D}{dRe_p} \frac{\partial Re_p}{\partial v_p} (M\sqrt{\gamma RT} - v_p)^2 - 2C_D (M\sqrt{\gamma RT} - v_p) \right] = \lambda \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_D}{dRe_p} \frac{\partial Re_p}{\partial M} \rho (M\sqrt{\gamma RT} - v_p)^2 \\ + C_D \left[\frac{d\rho}{dM} (M\sqrt{\gamma RT} - v_p)^2 + 2\rho (M\sqrt{\gamma RT} - v_p) \left[\sqrt{\gamma RT} + M \frac{\sqrt{\gamma RT}}{2T} \frac{dT}{dM} \right] \right] \\ = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$v_p = k \quad (19)$$

Las raíces de la expresión (18) se buscan a través del método de Newton–Raphson. A continuación, se definen las derivadas en relación al número de Reynolds relativo.

$$\frac{dC_D}{dRe_p} = \frac{-24(0,04695Re_p^{0,687} + 1)}{Re_p^2} + \frac{2,0706e4Re_p^{-2,16}}{(1 + 4,25e4Re_p^{-1,16})^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial Re_p}{\partial v_p} = -\frac{\rho d_p}{\mu} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Re_p}{\partial M} = \frac{d_p}{\mu^2} \left[\frac{d\rho}{dM} (M\sqrt{\gamma RT} - v_p) + \rho \left(\sqrt{\gamma RT} + M \frac{\sqrt{\gamma RT}}{2T} \frac{dT}{dM} \right) \right] \mu \\ - \rho (M\sqrt{\gamma RT} - v_p) \frac{d\mu}{dT} \frac{dT}{dM} \end{aligned} \quad (22)$$

Cabe destacar que, las derivadas de la temperatura y la densidad del gas dependen únicamente de M , como queda recogido en las siguientes ecuaciones junto con la expresión de la viscosidad del gas.

$$\frac{dT}{dM} = -T_0(\gamma - 1)M \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right]^{-2} \quad (23)$$

$$\frac{d\rho}{dM} = -\rho_0 M \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (24)$$

$$\frac{d\mu}{dT} = \mu_0 \left[-\frac{T_0 + C_s}{(T + C_s)^2} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3}{2T_0} \left(\frac{T_0 + C_s}{T + C_s} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (25)$$

Finalmente, la ecuación diferencial (26) del movimiento de las partículas combinada con las ecuaciones (17), (18) y (19) explica el problema de optimización llevado a cabo en este modelo, teniendo en consideración la restricción inicial de la velocidad de la partícula en la garganta de la boquilla (v_0).

$$\frac{dv_p}{dx} = \frac{C_D \rho A_p}{2m_p v_p} (M\sqrt{\gamma RT} - v_p)^2 \quad (26)$$

$$v_p(0) = v_0$$

El número de Mach al pasar de un flujo subsónico a uno supersónico en la garganta adquiere un valor igual a 1 en este punto. No obstante, aparece una discontinuidad geométrica a causa del número de Mach obtenido en el siguiente paso por medio del método de los multiplicadores de Lagrange, siendo considerablemente más grande que la unidad. La solución a este inconveniente propone un criterio geométrico que fija un ángulo divergente máximo, por debajo del cual se seguirá utilizando el número de Mach óptimo calculado por las ecuaciones (17), (18), (19) y (26). En el caso contrario, es decir, al disponer de un ángulo superior al máximo, se fuerza a cumplir dicho requisito mediante una restricción adicional en el rango del número de Mach para asegurar una transición suave, como queda aclarado en el diagrama de flujo de la *Figura 5*. Este inconveniente se analizará posteriormente tras la definición de las variables influyentes [12].

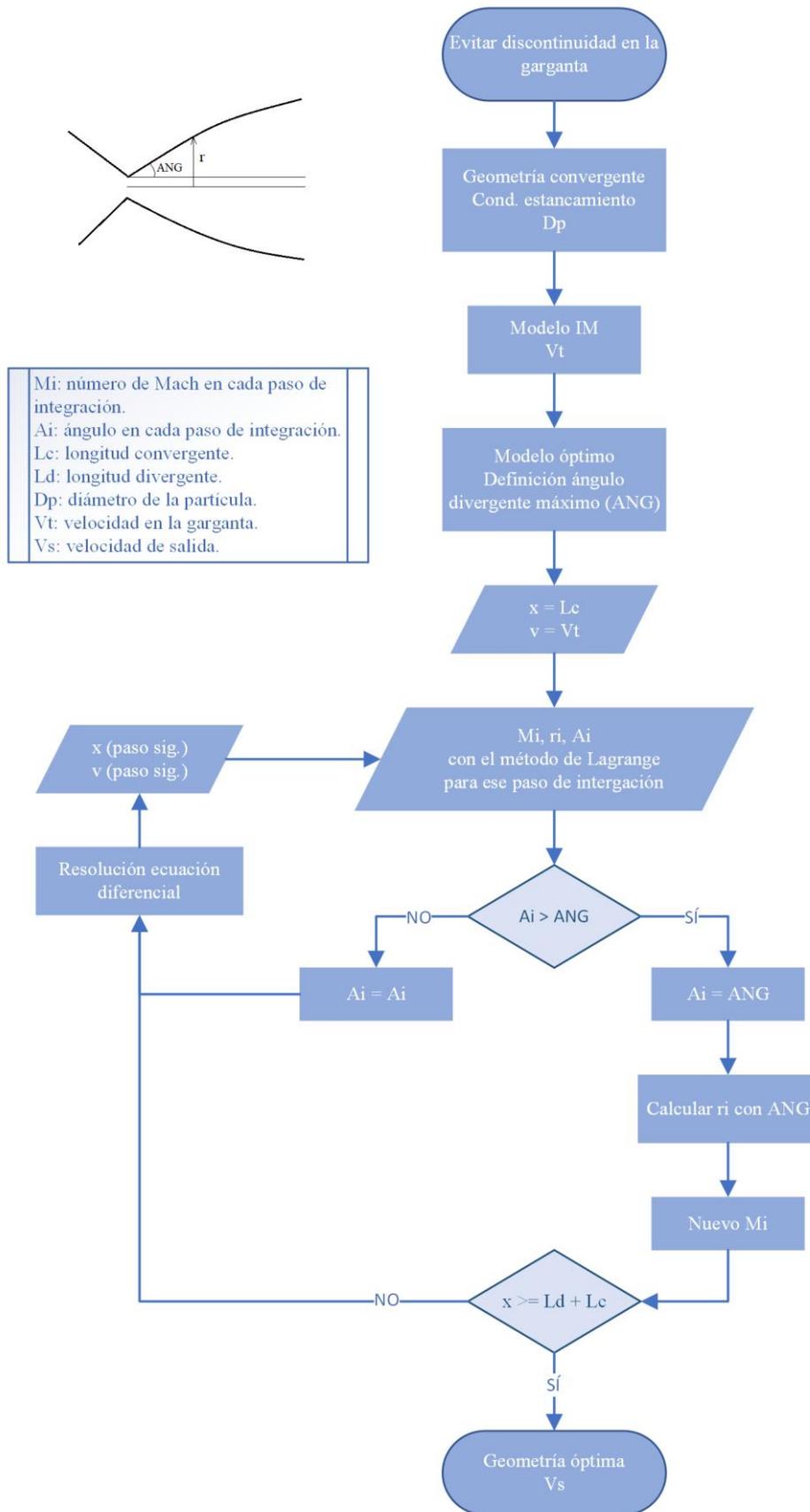


Figura 5. Diagrama de flujo que explica el procedimiento a seguir por la discontinuidad en el número de Mach en la garganta de la boquilla.

4.2. ESTUDIO DE PARÁMETROS DETERMINANTES EN LA VELOCIDAD DE SALIDA DE LA PARTÍCULA

La velocidad de proyección de las partículas es una variable determinante para una correcta deposición, como se ha explicado anteriormente. Por lo que, es necesario el estudio de las características que afectan directamente al valor final de la velocidad y la adecuada elección de las variables que maximizan este término. Los mapas de interés en esta sección se realizaron con un diámetro promedio de partícula de 25 μm antes de su análisis, por ser el valor central dentro del rango de estudio de 5 a 50 μm .

4.2.1. Gas portador

Los gases más utilizados en proyección en frío serán aquellos con bajos pesos moleculares, ya que al ser más ligeros pueden alcanzar velocidades más altas mediante una boquilla convergente-divergente. Se considerarán el nitrógeno (N_2) y el helio (He) como candidatos para la elección del gas portador.

El helio y el nitrógeno son gases inertes, que impiden la generación de reacciones químicas con el ambiente bajo condiciones normales y soportan elevadas temperaturas sin reactivos. El helio es un gas más ligero frente al nitrógeno, puesto que presenta una densidad de 0,1785 kg/m^3 en comparación con 1,2506 kg/m^3 , por lo que alcanza velocidades más altas. No obstante, el helio es extremadamente caro e inaccesible para uso general, destinado únicamente a determinadas aplicaciones. Además, la mezcla de ambos gases no es recomendada, porque se obtiene un mayor peso molecular del gas mixto resultante y con ello, una reducción de la velocidad.

Por el contrario, el nitrógeno es más económico, pero el rango de velocidades alcanzadas es menor debido a su mayor peso molecular. En conclusión, la mejor opción para las aplicaciones de la proyección en frío es el nitrógeno [10].

4.2.2. Radio y velocidad inicial de la partícula en la garganta de la boquilla

El análisis del radio en la garganta se realizará mediante la *Figura 6*, hallada con los resultados a partir de la geometría óptima de la boquilla presentada más adelante, donde se considera que la velocidad de salida de las partículas, parámetro que buscamos optimizar en todos los aspectos, disminuye levemente al aumentar la dimensión del radio. De forma que, se puede establecer que la velocidad no se ve sensiblemente afectada por la variación del radio en la garganta en el intervalo descrito, y se utilizará un valor de 1,5 mm para adecuar la geometría.

Por consiguiente, la velocidad de la partícula en la garganta tendrá una relevancia significativa sobre la velocidad de salida, como se refleja en la *Figura 7*. Se podría establecer una relación directamente proporcional entre las variables de contorno, puesto que al aumentar tanto la longitud de la parte divergente de la boquilla como la velocidad inicial en la garganta, se continúa la misma tendencia con la velocidad de proyección de la partícula.

Cabe destacar que, la velocidad en la garganta dependerá principalmente del tamaño de partícula seleccionado, como queda recogido en la ecuación (7) del modelo isoentrópico unidimensional y en la ecuación (26) del modelo optimizado. Por consiguiente, se fijarán en la *Tabla 1* las velocidades en esta posición para cada diámetro de partícula considerando una longitud de la parte divergente de 200 mm, que se expondrá su selección en el siguiente apartado. Los valores presentados a continuación se calculan inicialmente para el modelo completamente integrado (IM) centrado en una geometría cónica comercial con las dimensiones de la parte convergente predefinidas por el usuario, individualmente para cada diámetro de partícula junto con las condiciones de presión y temperatura de estancamiento, a fin de, extraer la velocidad del punto más cercano a la garganta. Posteriormente, se impone dicha velocidad como variable de entrada en el modelo optimizado, favoreciendo el cálculo del perfil divergente de la boquilla más aproximado para cada tamaño de partícula. La comprensión de este proceso puede verse apoyada por la parte azul del flujograma de la *Figura 8*.

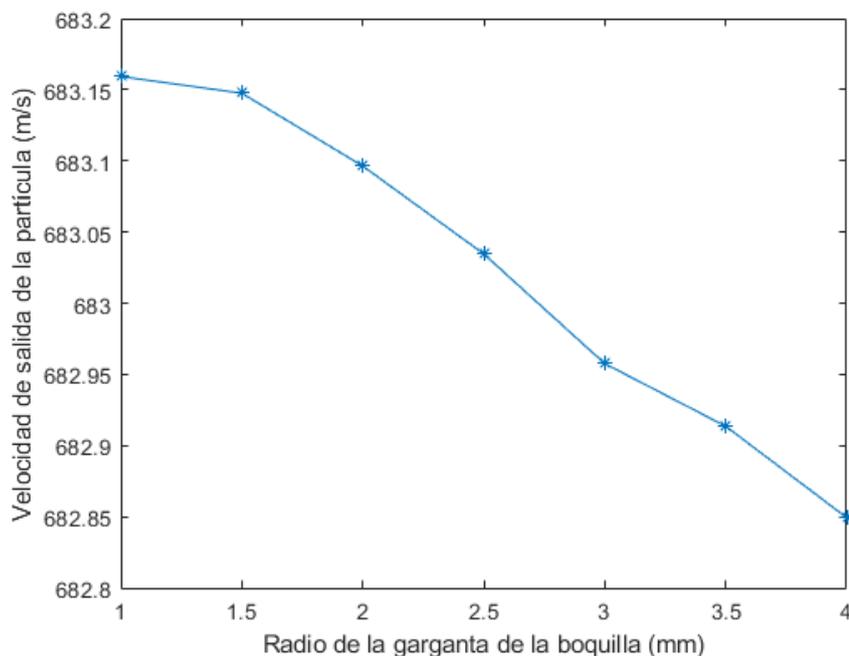


Figura 6. Gráfica que indica la evolución de la velocidad de salida (m/s) de las partículas respecto a la variación del radio en la garganta (mm).

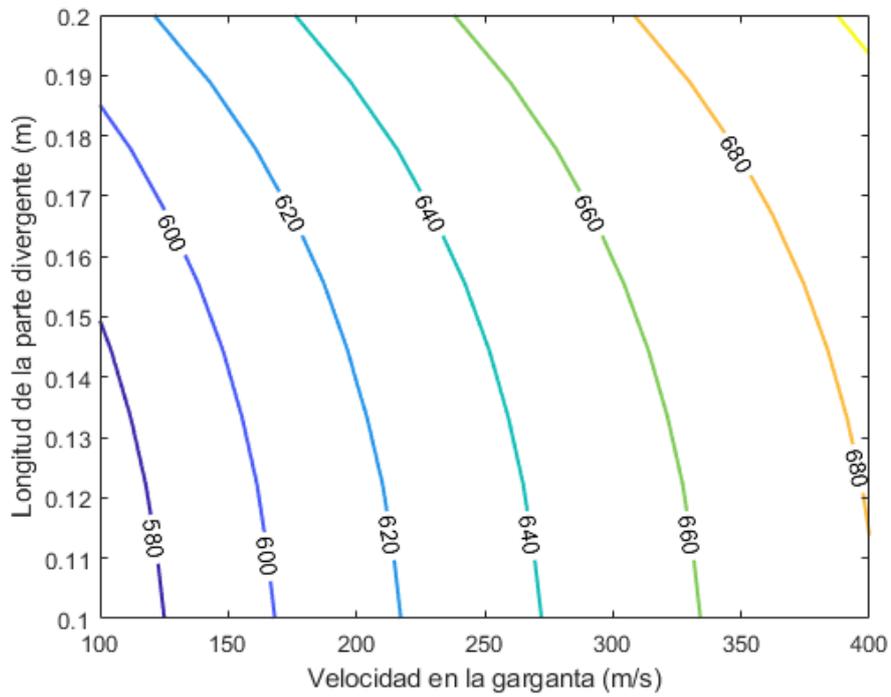


Figura 7. Diagrama de contorno de la velocidad de salida (m/s) en relación a la velocidad inicial en la garganta (m/s) y la longitud divergente de la boquilla (m).

Tabla 1. Resumen de las velocidades de partículas (m/s) en la garganta para cada tamaño de partícula (μm).

5 μm	10 μm	15 μm	20 μm	25 μm	30 μm	35 μm	40 μm	45 μm	50 μm
355,96 m/s	295,86 m/s	260,37 m/s	233,38 m/s	213,99 m/s	199,07 m/s	188,07 m/s	177,90 m/s	167,99 m/s	161,50 m/s

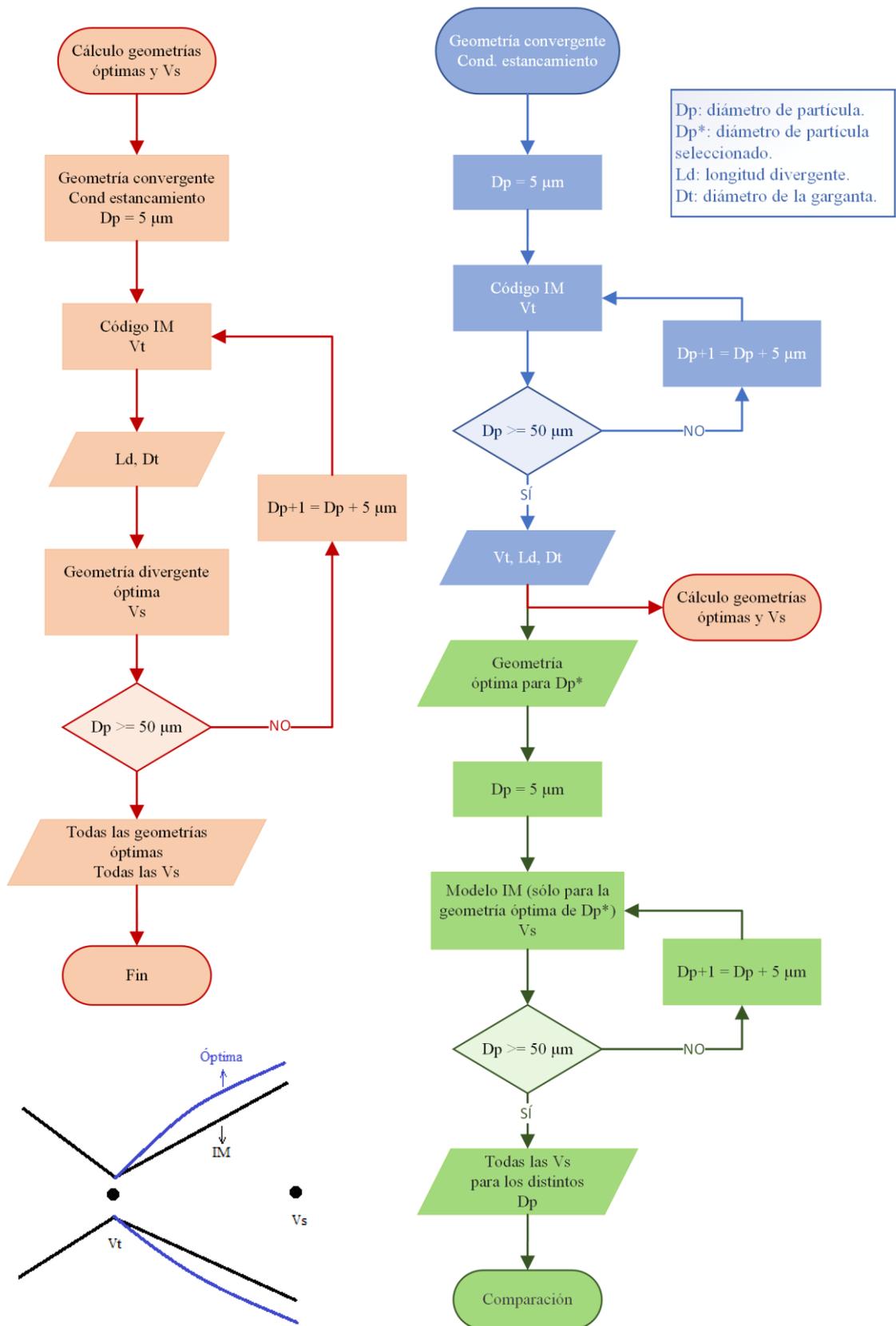


Figura 8. Diagrama de flujo sobre el procedimiento a seguir para la determinación de las velocidades en la garganta para cada tamaño de partícula.

4.2.3. Longitud de la parte divergente de la boquilla

S. Yin et al. [27] definieron la longitud divergente (L_d), en función de la velocidad de impacto de la partícula (v_{impacto}) y la ratio de expansión, que se define mediante la siguiente expresión para la solución isoentrópica 1D.

$$\text{Ratio de expansión} = \frac{A}{A^*} = \frac{\pi \cdot 0,0017^2}{\pi \cdot 0,001^2} = 2,7797$$

Donde A es la sección transversal de salida de la boquilla y A^* es la correspondiente a la garganta. Estos valores pueden determinarse debido a que ya se evaluaron todas las variables del proceso, y se utilizaron los cálculos obtenidos de la geometría optimizada, que se explicarán en apartados posteriores.

La *Figura 9* muestra la existencia de una longitud divergente óptima que garantiza la velocidad de impacto más alta, para cualquier condición. Las boquillas con una zona divergente extensa promueven velocidades de partículas más altas al permitir un tiempo de aceleración más largo. Adicionalmente, las boquillas con relaciones de expansión superiores, obtendrán una longitud y velocidad de impacto óptimas también mayores.

Aunque, cuando se sobrepasa una cierta longitud divergente, las ventajas causadas por el tiempo de aceleración prolongado se suprimen por el efecto negativo de una fuerza de arrastre baja. A partir de dicho valor, la velocidad de impacto se reducirá. Cabe destacar que, alcanzar este estado crítico será más difícil, cuanto más larga sea la parte divergente.

La *Figura 10* ilustra la evolución decreciente del número de Mach (M) al aumentar la longitud divergente, lo que indica que M y L_d no podrán lograr el valor máximo en el mismo instante, pues v_{impacto} no sigue la misma tendencia de variación.

En la cuestión de análisis de este trabajo, se determina mediante la *Figura 9* que para una relación de expansión de 4 (2,94 para la hipótesis isoentrópica) y un diámetro de 20 μm , la velocidad de impacto máxima se logrará a 200 mm, para luego descender significativamente.

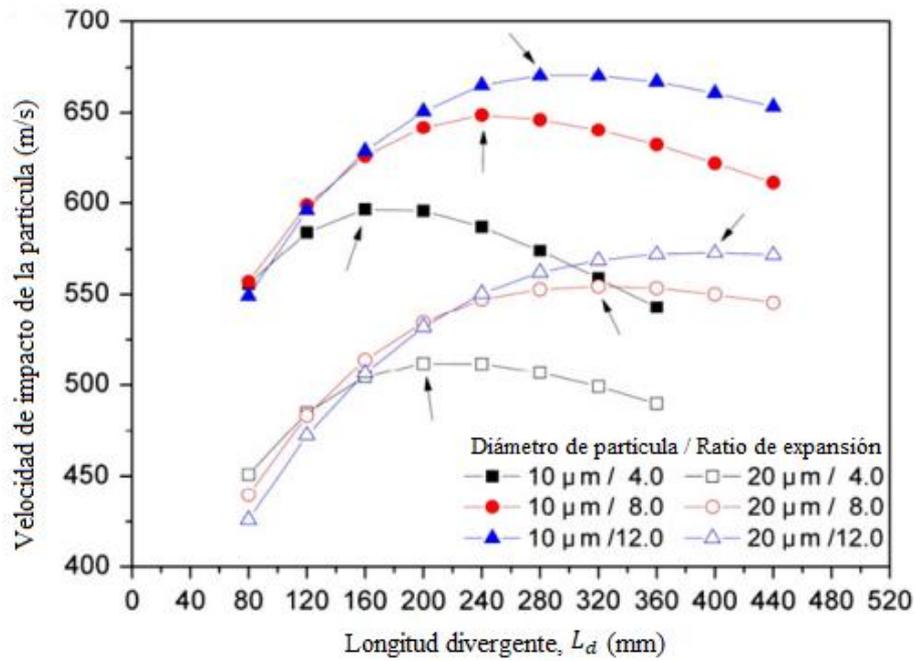


Figura 9. Gráfica que recoge la velocidad de impacto de las partículas (m/s) frente a la longitud divergente (mm) para diámetros de partículas de 10 y 20 μm , y distintas relaciones de expansión (4, 8, 12) [27].

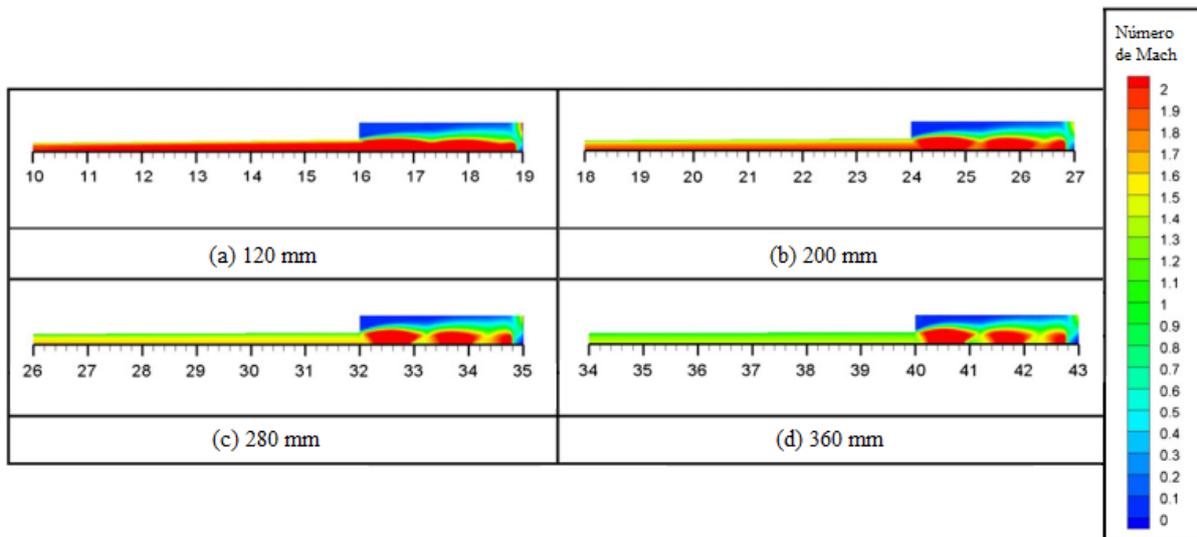


Figura 10. Representación por zonas de la variación del número de Mach a lo largo de la boquilla para diferentes longitudes divergentes (mm), con una ratio de expansión de 4 [27].

La Figura 11 permite la comprobación teórica de las suposiciones mencionadas, evidenciando el aumento de la velocidad de salida una vez se hace más larga la parte divergente de la boquilla en un rango de hasta 200 mm, por ser el valor crítico indicado en la Figura 9 y, por consiguiente, aquel finalmente elegido para la simulación.

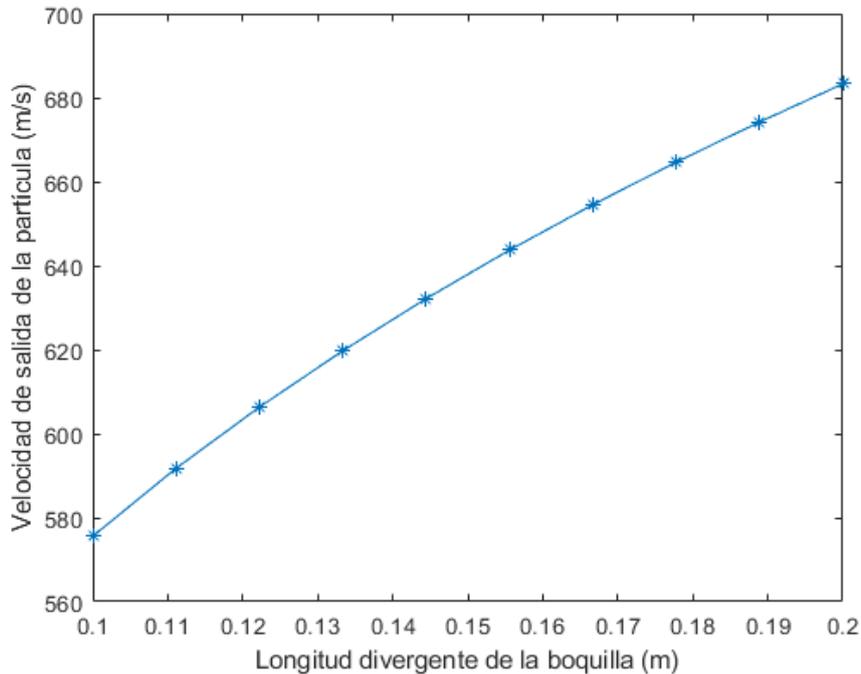


Figura 11. Gráfica que relaciona la velocidad de salida de la partícula (m/s) con la longitud divergente de la boquilla (m) para un diámetro de 25 μm .

4.2.4. Temperatura y presión de estancamiento

La aplicación de temperaturas bajas mantiene la composición inicial del polvo y facilita a los recubrimientos la obtención de menores tensiones residuales de tracción, oxidación y la formación de fases indeseables. Sin embargo, el empleo de temperaturas más altas es interesante debido a que se produce un ablandamiento térmico de las partículas que promueve velocidades superiores y con ello, un aumento lineal de la eficiencia de deposición.

Sirvent et al. [9] mostraron que a una temperatura de 500 °C se equilibra el proceso de adhesión de partículas de Al 2024 en las paredes de la garganta de la boquilla, ya que a 650 °C empeora este inconveniente, considerando el punto de fusión del aluminio a 660 °C. También, demostraron que los recubrimientos proyectados a una temperatura de 500 °C poseen menor espesor que los depositados a 350 °C y que sus propiedades mecánicas se ven afectadas por el valor de la temperatura. En la *Tabla 2* se puede apreciar que el recubrimiento a 500 °C consta de una microestructura menos endurecida, cuyos valores de dureza H y HV son inferiores en comparación con la deposición a 350 °C.

Tabla 2. Valores para analizar la dureza de los recubrimientos de Al 2024 a distintas temperaturas.

	Módulo de elasticidad E (GPa)	Nanodureza H (GPa)	Microdureza HV (GPa)
Recubrimiento depositado a 500 °C	68,6 ± 1,5	1,14 ± 0,11	1,36 ± 0,06
Recubrimiento depositado a 350 °C	72,2 ± 1,5	1,43 ± 0,19	1,5 ± 0,13

S. Yin et al. [27] determinaron la presión de estancamiento (P_0) en relación al número de Mach en la salida de la boquilla, la velocidad de la partícula y la relación de expansión.

La *Figura 12* permite realizar un análisis acerca de la evolución de la velocidad de la partícula (v_p) respecto a la ratio de expansión, cuyo valor calculado en el desglose de L_d se puede aproximar de igual forma al comportamiento de la boquilla 1. Se muestra la tendencia creciente de v_p a medida que aumenta la P_0 de manera gradual, debido al incremento de la fuerza de arrastre sobre la partícula con la presión de estancamiento. Además, cuando se supera un rango de valores de P_0 , en torno a 2,5 MPa, las diferencias entre las pérdidas de velocidades de todas las boquillas se minimizan considerablemente entre sí, por la pérdida de viscosidad que es prácticamente la misma.

La situación del número de Mach (M) queda adecuadamente reflejada en la *Figura 13*, donde para el caso de 0,5 MPa (*a*) se forman ondas de choque en el interior de la boquilla, lo que produce una disminución significativa de la velocidad del gas, dando lugar a un número de Mach bastante bajo. Este fenómeno se ocasiona cuando la presión ambiental es mucho menor que la presión de salida de la boquilla, teniendo una presión de estancamiento pequeña. Si se aumenta la presión a 0,6 MPa (*b*) las ondas de choque se van aproximando a la salida de la boquilla, siguiendo una tendencia creciente del número de Mach. Al continuar el incremento de la presión, en la *Figura 13 (c)* se ve que las ondas de choque ya se encuentran en la zona de salida, porque se produjo el alcance de la presión máxima más allá de la cual se hace constante y el número de Mach no se ve afectado por la presión de estancamiento. Finalmente, la *Figura 13 (d)* representa el desarrollo de las ondas de choque completamente fuera de la boquilla, manteniéndose estable el valor máximo. Por lo que, aunque M se mantiene estable después de alcanzar un valor crítico de presión, la velocidad de la partícula puede continuar incrementándose.

En conclusión, se seleccionará una presión superior a 0,7 MPa para evitar la formación de las ondas de choque dentro de la boquilla y una temperatura dentro del rango de 500 a 600 °C, para impedir la adhesión de las partículas en las paredes de la garganta de la boquilla, incrementando el valor de la velocidad de salida.

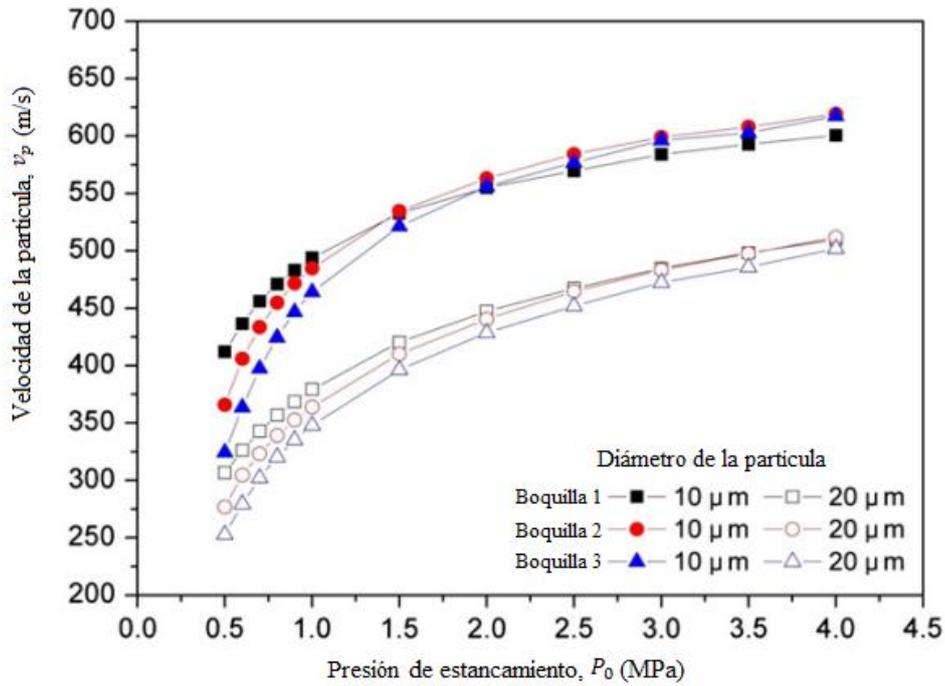


Figura 12. Gráfica que recoge la velocidad de impacto de las partículas (m/s) frente la presión de estancamiento P_0 (MPa) para diámetros de partículas de 10 y 20 μm , y distintas ratios de expansión [27].

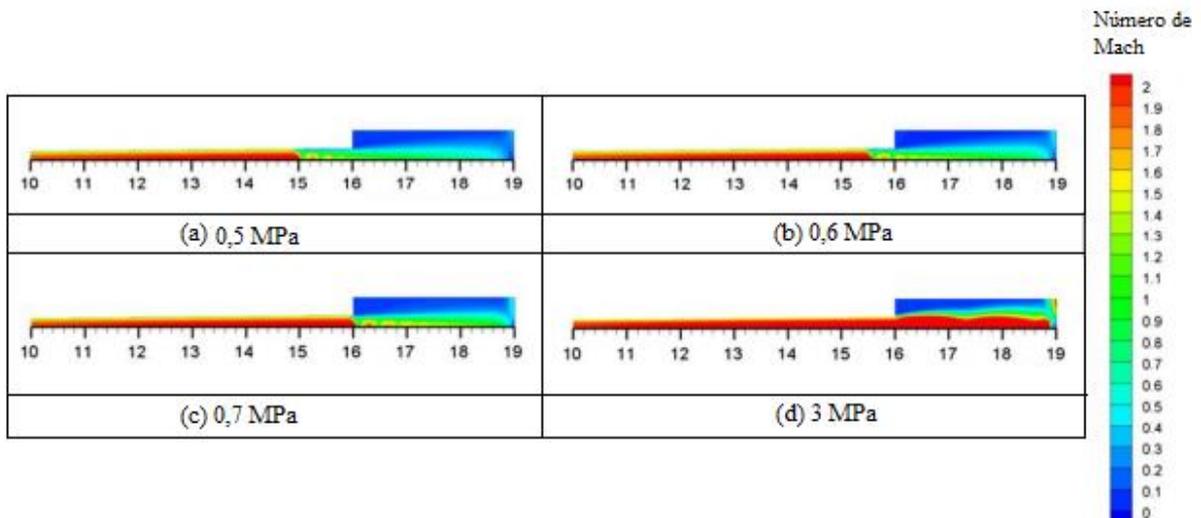


Figura 13. Representación por zonas del número de Mach para distintas presiones de estancamiento (MPa) en el caso de la ratio de expansión isoentrópica de 2,94 [27].

Por consiguiente, para verificar los resultados se lleva a cabo la representación en MATLAB de un diagrama de contorno que relaciona la velocidad de salida de la partícula con la variación tanto de la temperatura como de la presión de estancamiento. Según la *Figura 14* se cumplen las especificaciones anteriormente definidas para el caso de estudio de este trabajo, dado que se puede observar un aumento de la velocidad de salida de las partículas a medida que se avanza hacia valores superiores en ambos ejes. Aunque, cabe destacar que al utilizar una presión alta se puede alcanzar los mismos valores para la velocidad manteniendo una temperatura más baja e inversamente, porque la curva de cada velocidad sigue una tendencia decreciente.

En el caso de estudio, se trabaja con presiones bajas a causa de la selección de un equipo LPCS para la proyección del aluminio. Entonces, se buscará utilizar temperaturas más elevadas para compensarlo y alcanzar la máxima velocidad de partícula a la salida, para llevar a cabo una deposición exitosa.

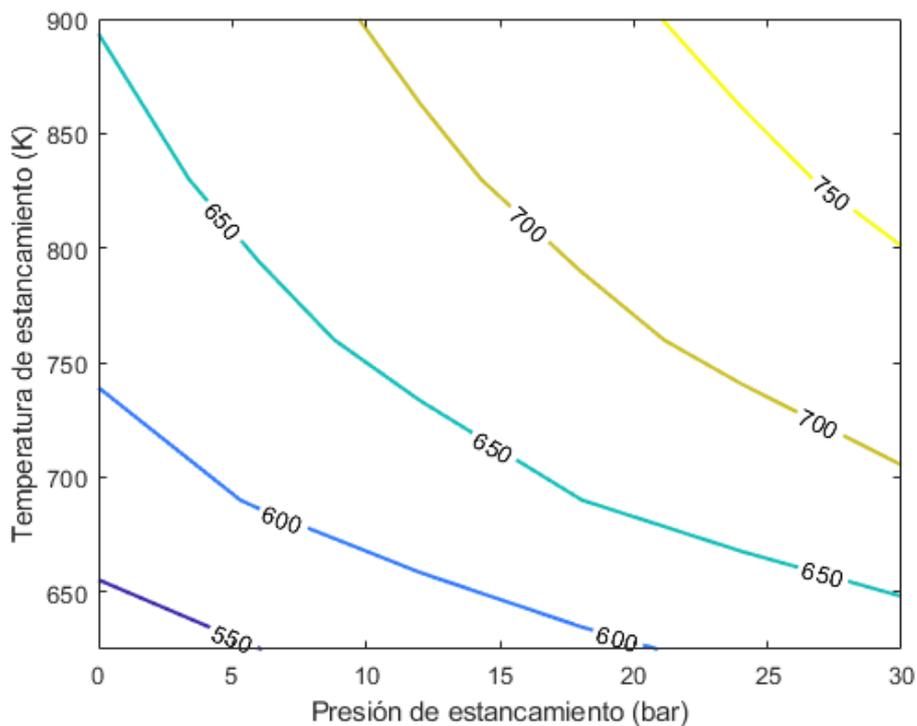


Figura 14. Diagrama de contorno de la velocidad de salida de la partícula (m/s) respecto a la temperatura (K) y presión de estancamiento (bar), para la geometría definida por el estudio.

La temperatura y la presión de estancamiento serán aquellas proporcionadas por el equipo de proyección en frío para la deposición del aluminio. Entonces, se podrá seleccionar entre sistemas de baja, media y alta presión. El material de las partículas utilizadas será el aluminio, por lo que se buscará un equipo que genere recubrimientos exitosos con la proyección de materiales ligeros y menores puntos de fusión (660,3 °C), como ocurre con los de baja presión (LPCS).

Se estudiaron distintas opciones comerciales LPCS, cuyas características específicas quedan recogidas en la *Tabla 3*. Se puede observar que la mayoría de los parámetros son muy similares entre los distintos equipos, con variaciones mínimas. Se ha presentado que el objetivo es que las velocidades de proyección de las partículas aumenten, y esto ocurre cuanto mayores son los valores de temperatura y presión de estancamiento, de forma que el sistema TITOMIC D523 se descarta por alcanzar la menor presión máxima. Entre los equipos resultantes, la única diferencia significativa es que TESSONICS DFCS 1000 requiere una potencia superior para obtener tasas de alimentación de polvo semejantes. Finalmente, el equipo seleccionado es DYMET 423 que trabajará a una presión máxima de 12 bar y a una temperatura de estancamiento de 600 °C para este estudio.

Tabla 3. Comparación de los valores característicos de los equipos comerciales LPCS.

<i>Equipos de baja presión</i>	DYMET 423	TITOMIC D523	TESSONICS DFCS 1000
<i>Presión máxima de trabajo</i>	12 bar	10 bar	12 bar
<i>Rango de temperatura de trabajo</i>	200 - 600 °C	20 - 600 °C	20 - 600 °C
<i>Tasa de alimentación de polvo</i>	0,1 - 0,8 g/s	0,5 g/s	0,05 - 0,9 g/s
<i>Requisitos de potencia</i>	3,3 kW	3,3 kW	5 kW



Figura 15. Equipo profesional de proyección en frío DYMET 423 utilizado por control manual o por control numérico computarizado (CNC).

4.3. DISEÑO GEOMÉTRICO MEDIANTE MATLAB

Tras el prólogo teórico se simularon los modelos en el software de MATLAB para poder hallar las soluciones numéricas y gráficas, a partir de la selección previa de los parámetros de entrada.

4.3.1. Optimización y suavizado de la geometría divergente de la boquilla

Inicialmente será necesario el desarrollo de la implicación del ángulo de restricción ya explicado en el apartado 4.1.2 junto con el diagrama de flujo de la *Figura 5*, que se propuso como solución a la discontinuidad producida en la garganta de la boquilla basándose en una geometría divergente optimizada por medio del método de los multiplicadores de Lagrange, para asegurar un correcto flujo de gas.

La *Figura 16* representa la irregularidad a partir de 1,5 mm hasta 1,78 mm aproximadamente, para la geometría sin restricción. En comparación, se impusieron ángulos en la parte divergente de 2°, 5° y 8°, siempre por debajo del límite superior de 10° recomendado. Esta transición suave se puede llevar a cabo por el cálculo de las derivadas a ambos lados del punto de transición ajustadas a un 0,1% de la longitud divergente total, garantizando su crecimiento lineal. De esta forma, se recalculan los radios de la sección transversal dentro de este rango, convirtiendo la geometría divergente en una curva suave y garantizando la continuidad en las derivadas.

También, se confirma que las disimilitudes entre la curva de 5° y 8° son insignificantes, así como la existencia de un ángulo límite a partir del cual la geometría óptima no se ve afectada específicamente para una longitud divergente y condiciones de estancamiento determinadas [12].

Para consolidar el análisis del ángulo divergente, se llevó a cabo el diagrama de contorno de la *Figura 17*, que muestra la influencia prácticamente nula que tiene sobre la velocidad de salida de la partícula hasta un ángulo máximo de 2°. A partir de este valor, la velocidad de salida es completamente independiente de la restricción del ángulo y la longitud divergente, que se mantiene constante. Por lo que, se puede decir que la velocidad final no se vio afectada por la pequeña región en la que se delimitó la transición suave.

Asimismo, esta representación valida la relación de crecimiento mutuo entre la velocidad de salida y la longitud de la parte divergente, como se ha explicado previamente y manifiesta la responsabilidad de la mayor aceleración de las partículas a esta parte de la boquilla.

Finalmente, se selecciona un ángulo de 5° por su similitud más próxima a la curva producida para el caso sin restricción angular.

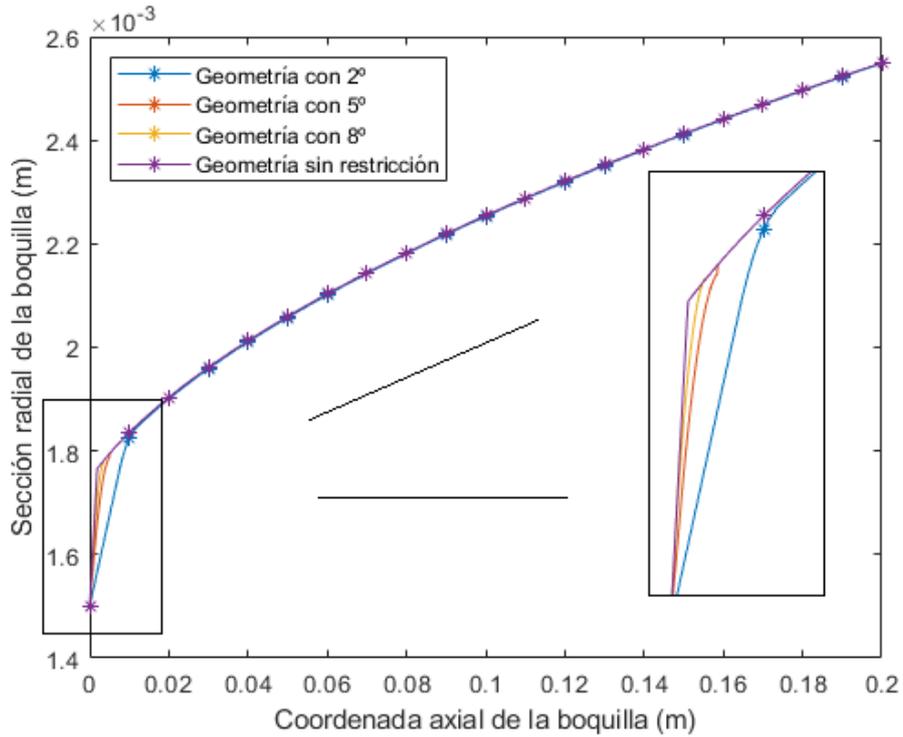


Figura 16. Representación de la geometría óptima con discontinuidad (morado) y suavizada con ángulos de restricción de 2° (azul), 5° (rojo) y 8° (amarillo).

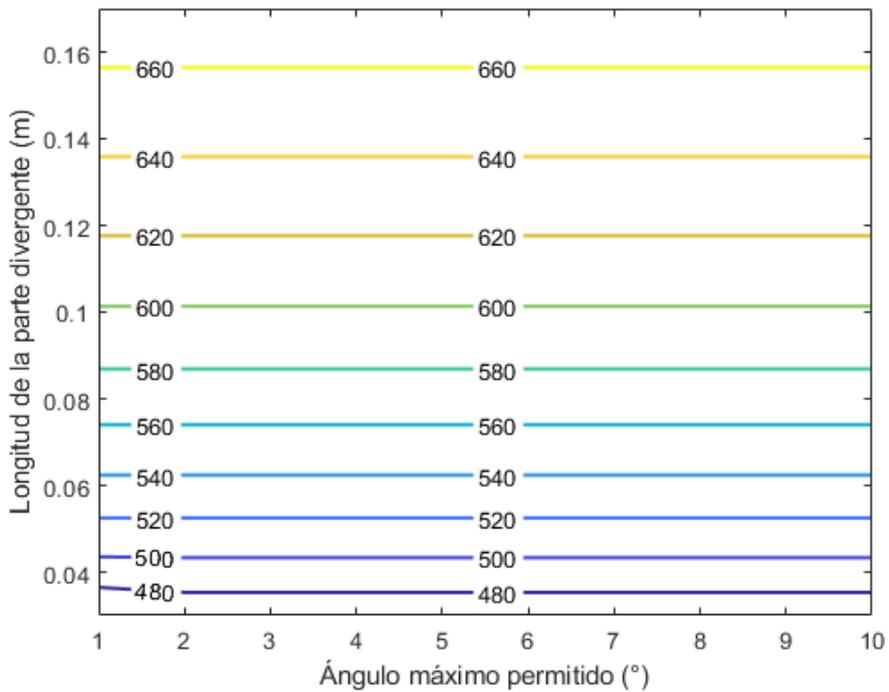


Figura 17. Diagrama de contorno de la velocidad de proyección de la partícula (m/s) analizada por la longitud de la parte divergente (m) y el ángulo de restricción máximo permitido (°).

4.3.2. Comparación entre el modelo simplificado (SM) y el modelo totalmente integrado (IM)

Los aspectos generales de forma de la zona convergente se encuentran recogidos en la literatura, ya que como se ha demostrado no inciden consecuentemente en los resultados relevantes [8], [21], [28]. Se procede a la utilización de un perfil cónico cuya parte divergente vendrá precisada por la geometría óptima con una transición suave de 5° . Para examinar correctamente las implicaciones de las hipótesis, se trabajó con una longitud convergente de 30 mm, un diámetro de entrada de 4 mm, una longitud divergente de 200 mm, un diámetro en la garganta de 3 mm y un diámetro de partícula promedio de aluminio de $25 \mu\text{m}$, parámetros seleccionados rigurosamente tras el estudio previo.

Bien es cierto que la presentación teórica permite una comprensión matemática de ambos modelos, aunque la aclaración de las principales diferencias respecto a la velocidad de salida de la partícula queda mejor reflejada mediante su cálculo a través de la geometría mostrada en la *Figura 18*, para distintas condiciones de estancamiento.

Las disimilitudes entre el modelo simplificado (SM) y el modelo totalmente integrado (IM) fueron consideradas variando la presión y la temperatura de estancamiento que proporcionan los equipos de proyección en frío.

En primer lugar, la *Figura 19* muestra las curvas que genera la velocidad de la partícula en cada posición de la boquilla, manteniendo una temperatura constante de 875 K para los casos señalados con una presión de 10, 14 y 20 bar representando equipos de baja y media presión, respectivamente. De manera general, la sobreestimación de la velocidad para SM no es despreciable. Al efectuar un enfoque principalmente en la velocidad de salida se determinan discrepancias en torno al 4% entre ambos modelos y su crecimiento al trabajar con valores de presión más elevados. Además, se observa la clara tendencia de un aumento de la velocidad junto con la presión y su bajada en la zona de la garganta, consecuencia del desplazamiento a través de una sección más pequeña en la boquilla. Tras su paso por dicha sección, SM produce un crecimiento exponencial de la velocidad que no describe correctamente el flujo de las partículas, de manera que para una posterior investigación se propone el estudio de las fuertes suposiciones que generan este suceso.

Por otro lado, se puede observar en la *Figura 20* una evolución similar en la velocidad de la partícula al variar la temperatura de estancamiento a 573, 723 y 873 K junto con una presión fija de 12 bar. En todos los casos, SM sobrevalúa la velocidad a lo largo de la coordenada axial de la boquilla con diferencias entre ambos modelos menores al 6% que tienden a disminuir con temperaturas superiores en la sección final. También, se identifica la relación de crecimiento de la velocidad de salida con la temperatura de estancamiento y la aparición de la irregularidad en la garganta.

En conclusión, la precisión del modelo simplificado es lo bastante acertada para la velocidad final de la partícula en comparación con el modelo totalmente integrado para bajas presiones y altas temperaturas. No obstante, el desarrollo de este parámetro durante el proceso completo verifica discrepancias que conllevan a la utilización del modelo IM para evitar errores de predicción, tales como la singularidad en la garganta de la boquilla.

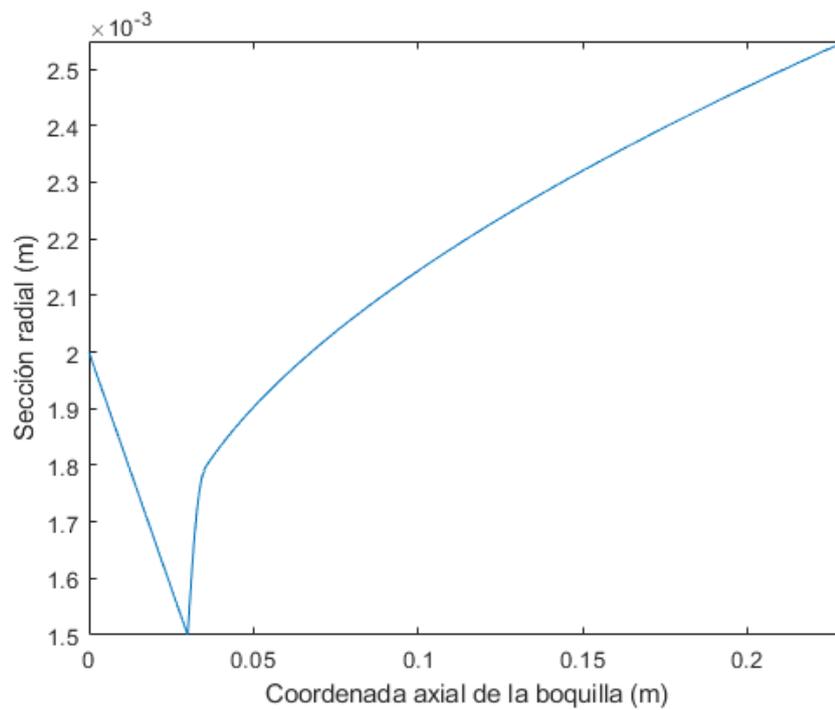


Figura 18. Geometría convergente-divergente cónica de la boquilla de proyección en frío con el perfil divergente óptimo.

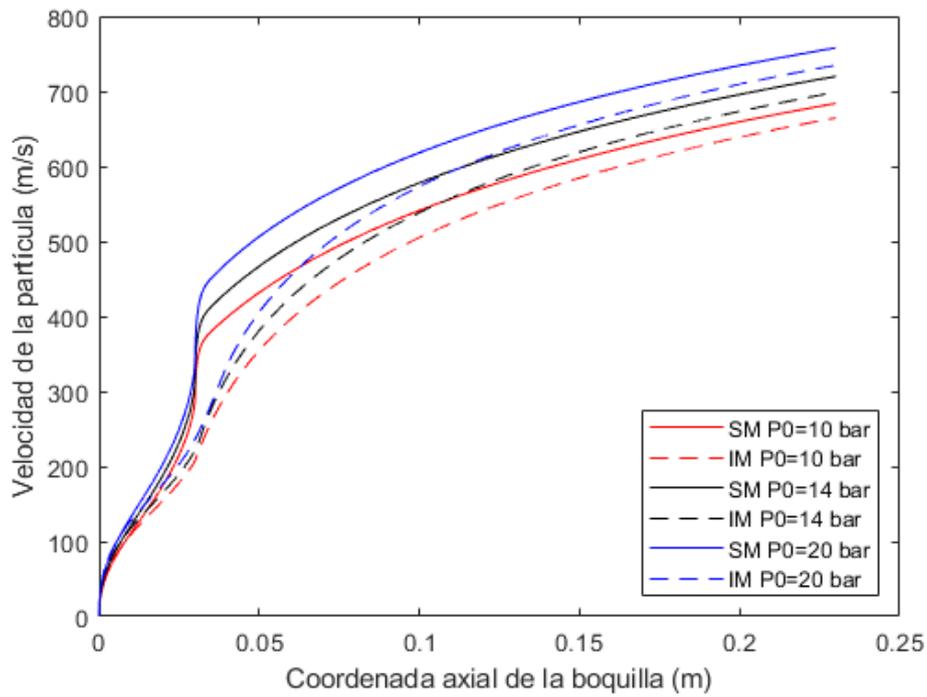


Figura 19. Velocidad de la partícula frente a la coordenada axial de la boquilla para diferentes presiones de estancamiento a una temperatura de estancamiento constante de 873 K tanto para el modelo simplificado (SM) y el modelo totalmente integrado (IM).

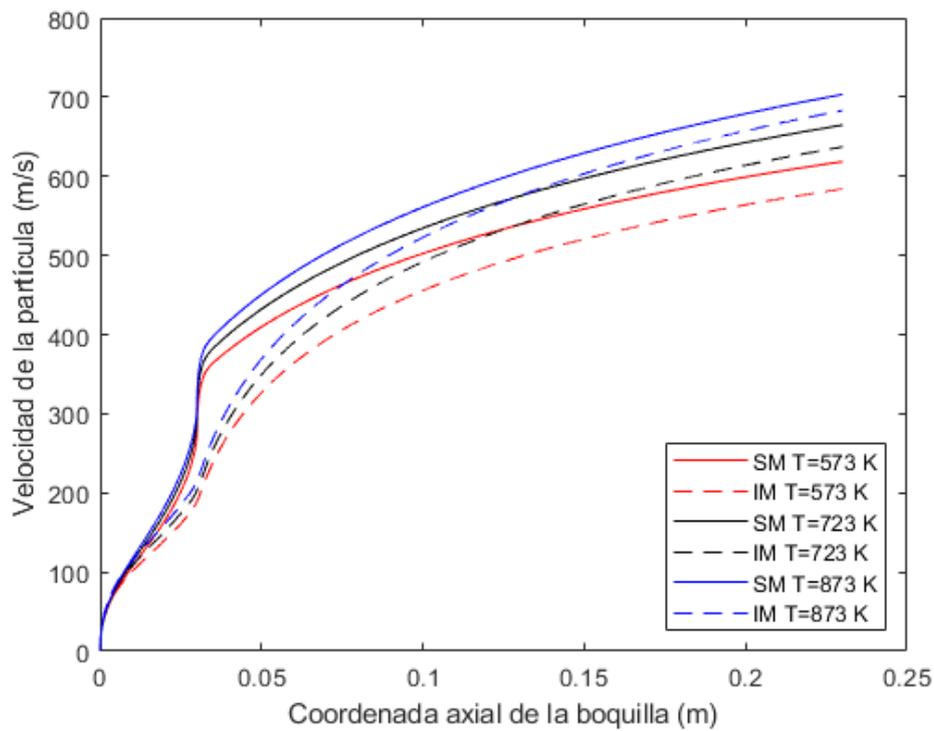


Figura 20. Velocidad de la partícula frente a la coordenada axial de la boquilla para diferentes temperaturas de estancamiento a una presión de estancamiento constante de 12 bar tanto para el modelo simplificado (SM) y el modelo totalmente integrado (IM).

4.3.3. La boquilla optimizada frente a la boquilla cónica clásica

El trabajo en profundidad requiere un contraste con la forma cónica convergente-divergente regular utilizada comercialmente (*Figura 21*). Para ello, se representa el perfil de velocidades de ambas geometrías respetando las mismas dimensiones empleadas en la *Figura 18*.

La *Figura 22* indica que la geometría clásica sigue la misma tendencia que la optimizada, manteniendo siempre una velocidad muy similar entre ambas. Se puede observar que la forma cónica ocasiona un perfil de velocidades por debajo de la optimizada.

La velocidad de salida de las partículas para la geometría comercial cuenta con un rango óptimo en el que se maximiza para una relación específica entre el diámetro de salida y el diámetro de la garganta, pero siempre con resultados inferiores a los obtenidos con el modelo optimizado [12]. De esta forma, se puede concluir que la nueva metodología aporta una mayor utilidad y mejora al modelo IM.

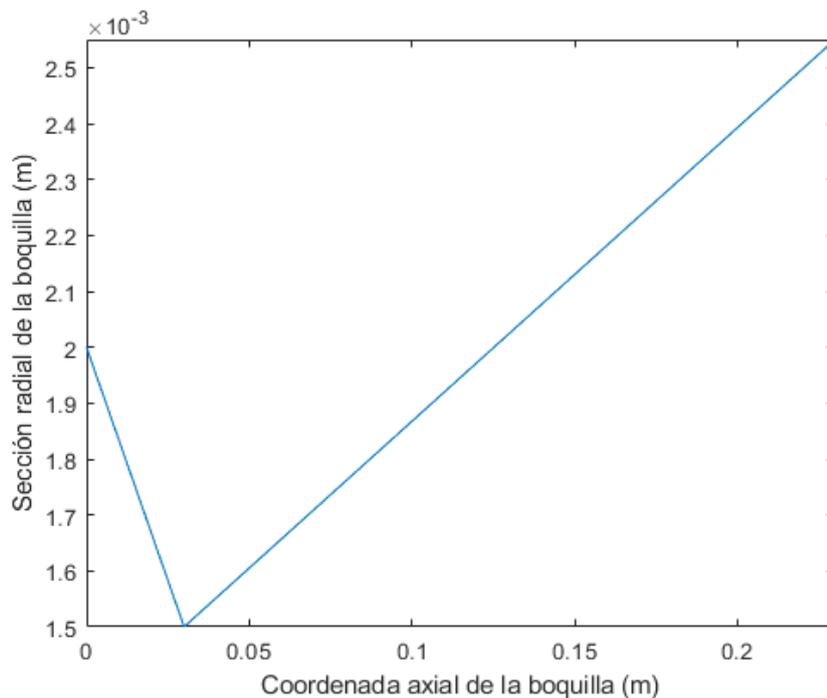


Figura 21. Geometría cónica clásica de la boquilla convergente-divergente de proyección en frío comercial.

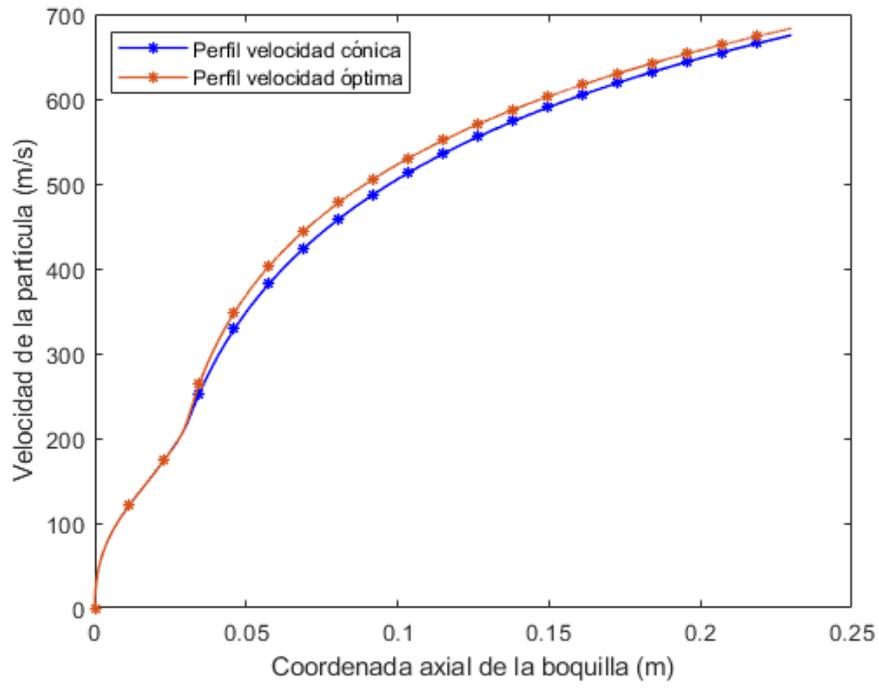


Figura 22. Perfil de velocidades (m/s) a lo largo de la longitud de la boquilla (m) para la geometría cónica clásica frente a la geometría optimizada.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN/SOLUCIÓN TÉCNICA

La geometría final de la boquilla de proyección térmica de la *Figura 18* constituye un paso importante junto con la ventana de la capacidad de proyección (WS) en el cálculo del marco de condiciones óptimas de impacto de las partículas (PIC). El completamiento del estudio requiere la elección del tamaño de partícula apropiado para este material y parámetros de estancamiento, evaluando la forma divergente de la boquilla y la velocidad óptima que supera a la crítica.

5.1. CARACTERÍSTICAS DEL GAS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

Es interesante contemplar la evolución de las propiedades primordiales del gas a lo largo del proceso de proyección. Se puede observar una desviación de la curva cualitativa prácticamente idéntica para la temperatura, la presión y la densidad del gas nitrógeno en las *Figura 23A*, *23B* y *23C*, respectivamente.

La temperatura y la presión del gas de proyección en frío normalmente está por encima de la ambiental, lo que se traduce en una mejora del rendimiento para mayores velocidades. Las partículas del polvo se calientan al entrar en contacto con el flujo de gas a una temperatura elevada, pero a medida que gana energía cinética, se enfría. Tras un período en el que la partícula se acerca a la velocidad del gas, la transferencia de energía ahora se efectúa con un gas frío, que resulta en el enfriamiento de la partícula. Si la partícula no es acelerada rápidamente y se mantiene estática, para que el gas pueda interactuar con ella debe disminuir su velocidad y conservar una temperatura constante. Dykhuizen y Smith [7] demostraron que la partícula interacciona con el gas lento y cálido durante intervalos de tiempo más largos que con el gas rápido y frío, presentando coeficientes de transferencia de calor más altos para el primero y ocasionando una temperatura ligeramente elevada para la partícula al impactar contra el sustrato. En conclusión, la aceleración del gas a través de la boquilla suscita la reducción de la temperatura y la presión mientras la velocidad aumenta como queda justificado al comparar la *Figura 24B* con la *Figura 23A* y *23B*.

El número de Mach (M) relaciona la velocidad del gas con la velocidad de propagación del sonido en ese medio y explica la superación de esta misma en la parte divergente para que el fluido siga acelerándose, convirtiendo la presión y la energía térmica en energía cinética. La transformación del número de Mach queda reflejada en la *Figura 24A* evidenciando valores por debajo de la unidad en la parte convergente de la boquilla en régimen subsónico hasta la garganta (30 mm), donde la reducción de la sección al paso de una constante permite lograr un flujo sónico ($M=1$) para posteriormente expandir la boquilla y alcanzar velocidades supersónicas en la zona divergente ($M>1$). Por consiguiente, el incremento de la velocidad del gas está fuertemente relacionado con el número de Mach como se enuncia en la *ecuación (5)* y en la analogía de ambas curvas.

La *Figura 23C* muestra que la variación del gas depende principalmente de los cambios de presión a lo largo del recorrido del fluido compartiendo una tendencia semejante. Valores menores de presión de estancamiento disminuirán la densidad del gas durante el proceso, lo que a su vez contribuirá a una velocidad del gas y de la partícula superiores [3].

Finalmente, se puede establecer que la velocidad del gas se verá influida principalmente por la temperatura y presión de estancamiento iniciales que determinará el rango de evolución de los parámetros del gas a lo largo de la boquilla, junto con el tipo de gas de proceso utilizado.

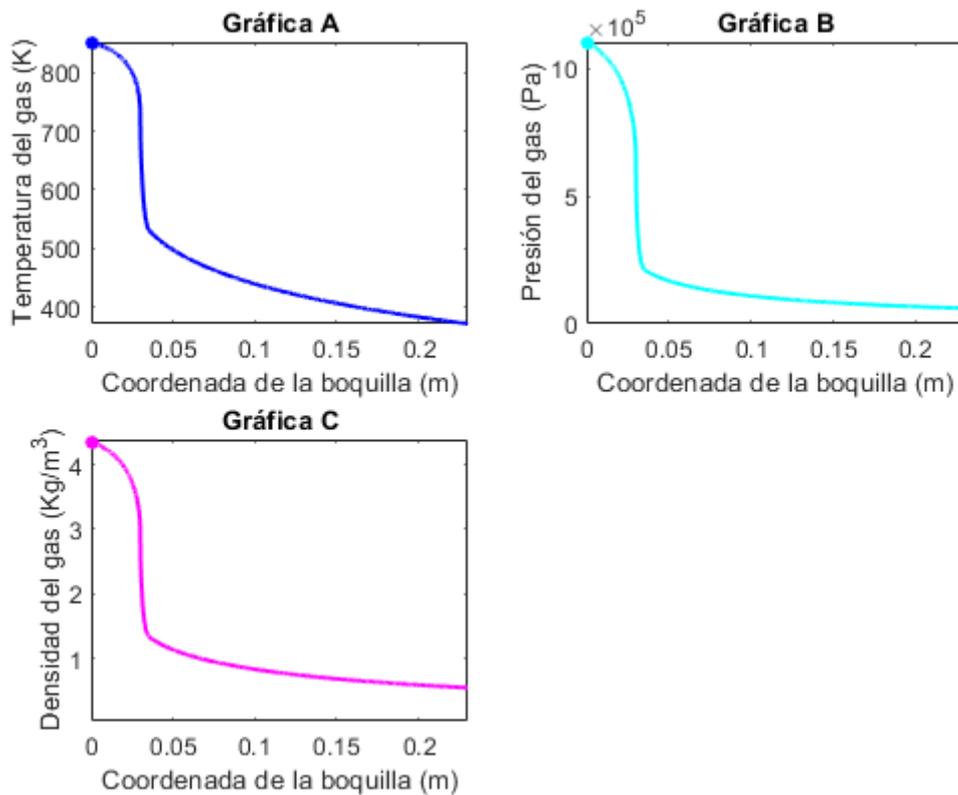


Figura 23. Representación gráfica de A) la temperatura del gas (K), B) la presión del gas (Pa), C) la densidad del gas (kg/m³) a lo largo de la boquilla (m).

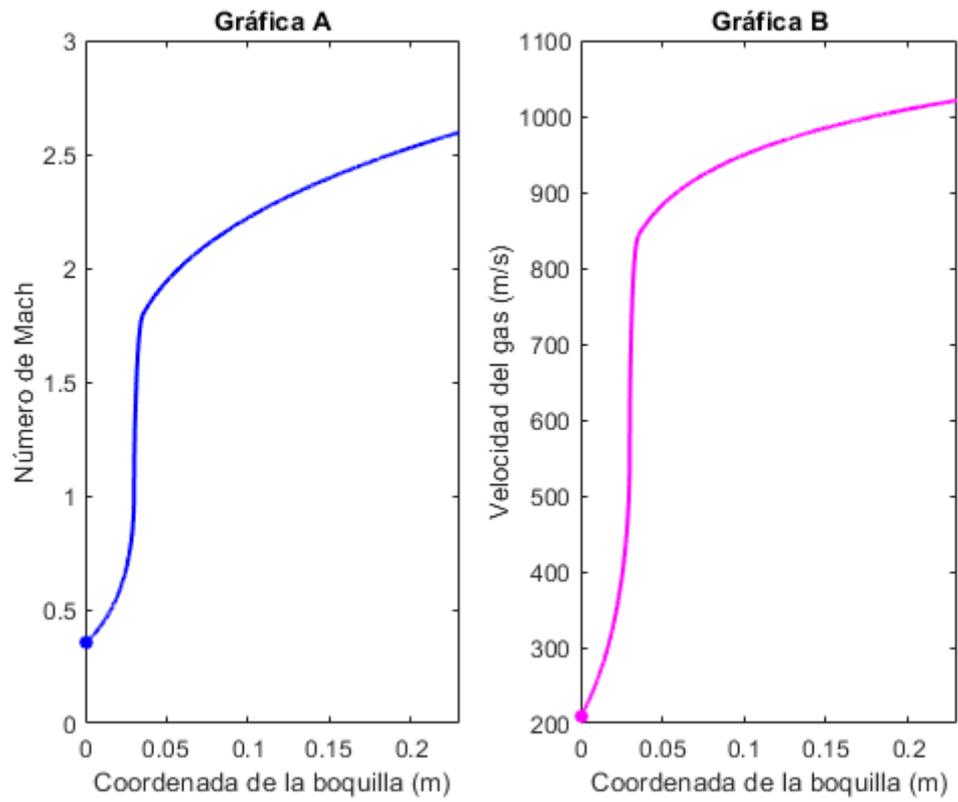


Figura 24. Representación gráfica de A) el número de Mach, B) la velocidad del gas (m/s) a lo largo de la boquilla (m).

5.2. PERFIL DE GEOMETRÍAS ÓPTIMAS PARA DISTINTOS TAMAÑOS DE PARTÍCULA

La geometría divergente óptima de la boquilla quedará definida por el tamaño y la densidad de las partículas. Numerosos estudios demuestran que las partículas más pequeñas y ligeras sufren mayores aceleraciones a causa de su menor masa, alcanzando velocidades de salida más altas respaldadas por la ley de conservación de energía y momento [10]. La *Figura 25* presenta el perfil de geometrías óptimas para un rango de tamaño de partícula desde 5 μm hasta 50 μm , que demuestra la obtención de diámetros de salida más grandes y diseños más abiertos a diámetros de partículas más pequeños y una concentración de las geometrías óptimas en un intervalo entre 20 y 50 μm que se hace más visible cuanto mayor es el tamaño.

Este fenómeno se puede explicar mediante el desarrollo del modelo teórico optimizado, donde el diámetro de partícula define el área de proyección que está directamente relacionado con la fuerza de arrastre (F_d). Luego, la introducción de menores tamaños de partículas en la simulación origina fuerzas de arrastre más pequeñas en comparación con diámetros superiores, debido al incremento de la superficie de proyección. No obstante, la explicación a la *Figura 25* muestra que la F_d máxima para partículas pequeñas se sobreestima, es decir, es superior a la que se alcanza en las mismas circunstancias con partículas más grandes proporcionalmente y establece que el modelo estima mejores resultados para diámetros de partículas a partir de 20 μm .

La fuerza de arrastre también se verá influenciada por el número de Mach óptimo y con ello, el valor del radio máximo que cumple la restricción angular. El *Apéndice I* proporciona una visión adicional para la comprensión de la variación de estos parámetros. El perfil geométrico más abierto se verifica al observar mayores secciones radiales que cumplen la restricción del ángulo para tamaños de partículas pequeños, junto con el aumento del número de Mach óptimo, y consecuentemente la ampliación del diámetro de salida de la boquilla.

Se puede observar en la *Figura 26* la evolución de la velocidad óptima de las partículas para cada diámetro, siguiendo el mismo comportamiento que con la geometría óptima puesto que también dependerá del área proyectada, la velocidad del gas y el número de Mach.

Schmidt et al. [11] revelan que la calidad de la adhesión aumentará con el diámetro de las partículas teniendo en consideración la misma velocidad de impacto, donde la temperatura máxima y el tiempo de unión determinados también se amplían. Cabe destacar que, las formas esféricas para diámetros promedios de partículas poseen coeficientes de resistencia más bajos que las irregulares, resultando en una velocidad más alta para las irregulares. Sin embargo, se requiere de las partículas con geometría regular para lograr una mejor adhesión y recubrimientos más densos.

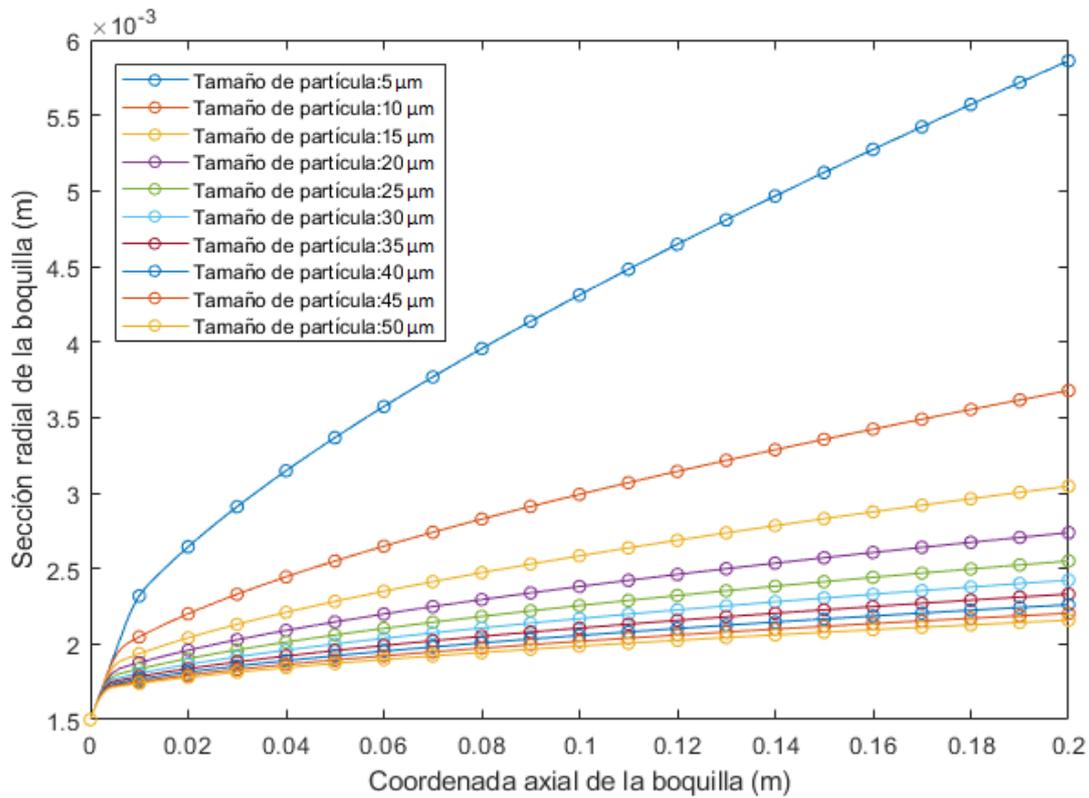


Figura 25. Perfil de geometrías óptimas divergentes desde un diámetro de partícula de 5 hasta 50 μm .

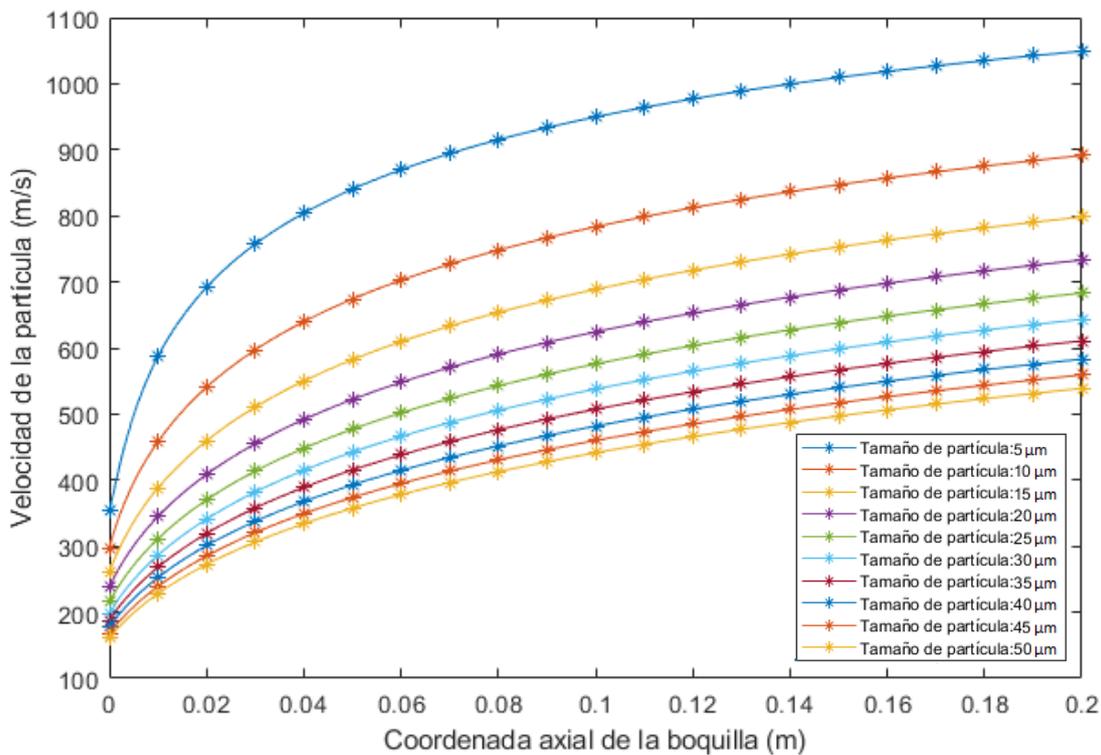


Figura 26. Perfil de velocidades óptimas (m/s) en la parte divergente desde un diámetro de partícula de 5 hasta 50 μm .

5.3. CONTRASTE ENTRE LAS PÉRDIDAS DE VELOCIDAD DE SALIDA

El rango válido para las geometrías óptimas definido previamente supone la base para la comparación de las velocidades de salida resultantes del método de los multiplicadores de Lagrange con las velocidades del método IM, representada en la zona roja y verde del diagrama de flujo de la *Figura 8*. Los tres tamaños de partícula promedios de 20, 25 y 35 μm se seleccionan para el estudio de dicho contraste, que queda agrupado en las *Tablas 5, 6 y 7*, respectivamente. El diámetro de partícula estudiado en cada tabla especifica el perfil divergente óptimo de la boquilla hallado por medio del método de los multiplicadores de Lagrange, que será empleado como la geometría de entrada para todos los tamaños desde 5 hasta 50 μm dentro del modelo IM, cuyas velocidades de salida quedan contempladas en la columna definida “Velocidad completa (m/s)”. Asimismo, se puede visualizar en el formato de las *Tablas 5, 6 y 7* una tercera columna designada como “Velocidad óptima (m/s)”, que engloba las velocidades óptimas particulares para cada diámetro de partícula y su geometría óptima determinada, permitiendo así el cálculo de las pérdidas (%) entre las dos velocidades de salida descritas. El perfil convergente empleado en el modelo IM consta de un diámetro de entrada de 4 mm, un diámetro en la garganta de 3 mm y una longitud convergente de 30 mm, como la forma descrita en la *Figura 18*.

La realización de una evaluación simultánea expone unas pérdidas de velocidad de salida más elevadas respecto al límite inferior de diámetro de partícula cercana a 5 μm , que gradualmente disminuye al trasladarse hacia partículas más grandes. También se valora la disminución de las pérdidas para las partículas más grandes (30 – 50 μm) y el siguiente aumento en el rango inferior (5 – 20 μm) cuando la geometría óptima se calcula con valores superiores de diámetros de partícula, afianzando la diferencia de los perfiles de velocidades óptimas de la *Figura 26*.

Luego, se puede observar que el uso de las geometrías óptimas para 20 y 30 μm originan una pérdida mayor para sus correspondientes diámetros, de 0,08 % y 0,05 % respectivamente, en comparación con la de 25 μm , lo que supone un indicativo de que la geometría con menores pérdidas será la de dicho tamaño con un 0,02 % y su selección final como el diámetro apropiado para esta simulación.

Tabla 5. Comparación de pérdidas (%) entre la velocidad óptima de salida para cada tamaño de partícula y la velocidad obtenida (m/s) mediante el modelo IM para la geometría óptima divergente de 20 μm .

20	Tamaño de partícula (μm)	Velocidad óptima (m/s)	Velocidad completa (m/s)	Pérdidas (%)
	5	1049,2834	978,9350	6,7044
	10	891,3100	877,0049	1,6050
	15	798,3041	796,2799	0,2536
	20	733,2145	732,5943	0,0846
	25	683,2809	681,6835	0,2338
	30	643,3920	640,1809	0,4819
	35	610,7004	605,6229	0,8314
	40	583,0675	575,2350	1,3433
	45	559,2947	550,4988	1,5727
	50	538,7425	529,1671	1,7774

Tabla 6. Comparación de pérdidas (%) entre la velocidad óptima de salida para cada tamaño de partícula y la velocidad obtenida (m/s) mediante el modelo IM para la geometría óptima divergente de 25 μm .

25	Tamaño de partícula (μm)	Velocidad óptima (m/s)	Velocidad completa (m/s)	Pérdidas (%)
	5	1049,2834	961,9139	8,3266
	10	891,3100	868,0500	2,6096
	15	798,3041	792,2293	0,7610
	20	733,2145	731,0716	0,2923
	25	683,2809	683,1509	0,0190
	30	643,3920	642,0869	0,1856
	35	610,7004	609,0096	0,2769
	40	583,0675	579,8252	0,5561
	45	559,2947	555,5279	0,6735
	50	538,7425	533,3271	1,0052

Tabla 7. Comparación de pérdidas (%) entre la velocidad óptima de salida para cada tamaño de partícula y la velocidad obtenida (m/s) mediante el modelo IM para la geometría óptima divergente de 30 μm .

30	Tamaño de partícula (μm)	Velocidad óptima (m/s)	Velocidad completa (m/s)	Pérdidas (%)
	5	1049,2834	947,8512	9,6668
	10	891,3100	860,2867	3,4806
	15	798,3041	788,0294	1,2871
	20	733,2145	729,5962	0,4935
	25	683,2809	682,1496	0,1656
	30	643,3920	642,9910	0,0451
	35	610,7004	610,1233	0,0945
	40	583,0675	581,1183	0,3343
	45	559,2947	557,1944	0,3755
	50	538,7425	536,5761	0,4021

La velocidad crítica que determina la adhesión dependerá del tamaño de las partículas. Aquellas con menores dimensiones presentan velocidades críticas superiores por una serie de efectos dinámicos que dificultan la deformación localizada, al contar con un endurecimiento por velocidad de deformación más profundo y una mayor resistencia al corte viscoso sobre la región en la que se produce el “jetting”. Asimismo, el proceso de producción del polvo con diámetros reducidos implica la exposición a velocidades de enfriamiento altas y la microestructura fina que las caracteriza viene enlazada con el endurecimiento de Hall-Petch, que explica su elevada resistencia. Las partículas más pequeñas suelen tener un mayor contenido de impurezas y contaminaciones en la superficie, como las capas de óxido, cuyo efecto contribuye al incremento de la velocidad crítica.

El apartado 2.2.1. señala la importancia de estimar la velocidad de salida de la partícula dentro de los límites impuestos por la velocidad crítica y la de erosión, con el propósito de incrementar la eficiencia de deposición y el crecimiento del recubrimiento. Es por ello que se recurre a los diagramas de las Figuras 27 y 28 que específicamente nos indican el rango a cumplir para partículas de aluminio de 25 μm . La velocidad final de la partícula utilizando el modelo óptimo será de 683,2 m/s que, al igualarla a los datos proporcionados se puede observar una localización justo por encima de la zona marcada como incertidumbre y que claramente no supera la velocidad de erosión para el aluminio. Cabe destacar que, la información utilizada está tabulada y basada en la historia mecánica y térmica de cada material [11].

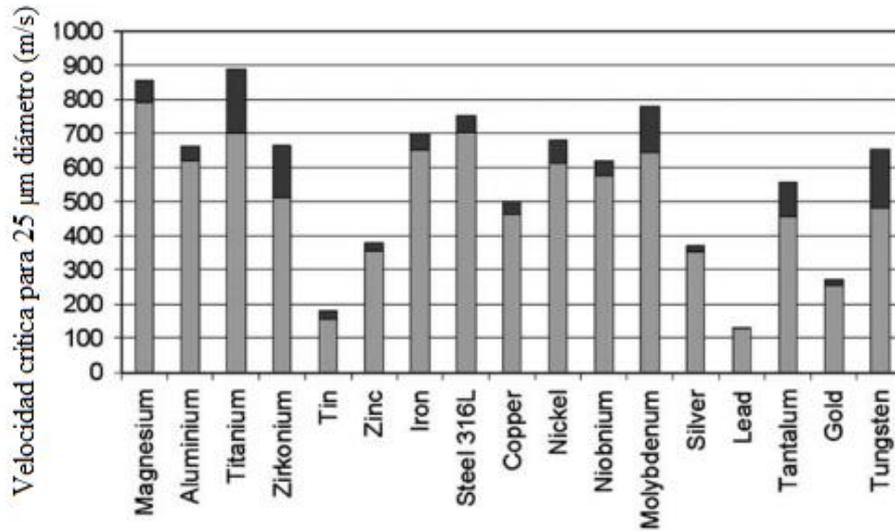


Figura 27. Diagrama de barras sobre las velocidades críticas tabuladas para un diámetro de partícula de 25 μm de distintos materiales. La zona oscura de las barras indica un rango de incertidumbre [11].

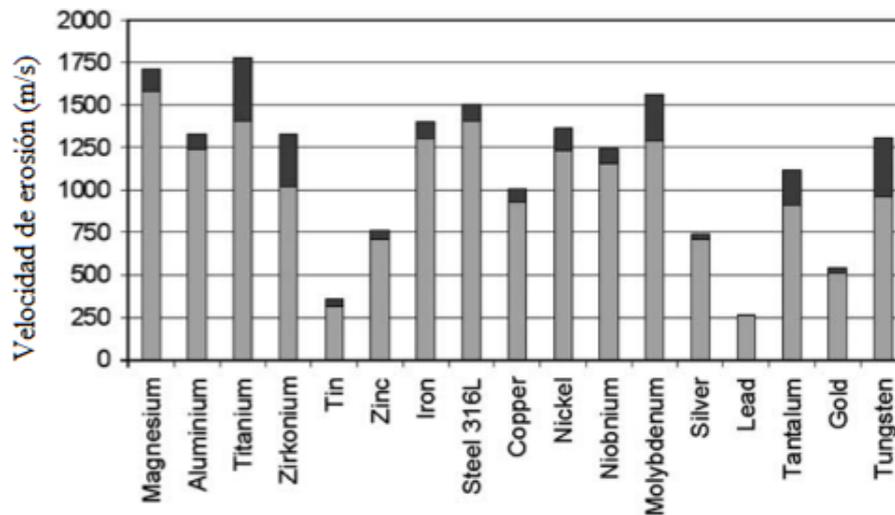


Figura 28. Diagrama de barras sobre las velocidades de erosión tabuladas para un diámetro de partícula de 25 μm de distintos materiales. La zona oscura de las barras indica un rango de incertidumbre [11].

5.4. MODELO DE LA GEOMETRÍA FINAL

El diseño de la geometría final de la *Figura 18* para la deposición del aluminio junto con la verificación del diámetro de $25\ \mu\text{m}$ que origina las menores pérdidas de velocidad y la superación del límite crítico en el supuesto de la utilización del método de los multiplicadores de Lagrange, conllevan al modelo completo de la boquilla en las *Figuras 29* y *30* mediante el software Fusion 360 para las condiciones precisadas en la sección 4.2.

El procedimiento seguido en la obtención del modelo se explica en el *Apéndice II*, donde simplificadaamente se procede a la inserción de las coordenadas del perfil geométrico completo para su posterior revolución especificando un grosor de la boquilla de 10 mm, una longitud divergente de 200 mm, un diámetro de entrada de 4 mm y un diámetro de salida de 4,93 mm dado por la geometría óptima. Por último, se aplica la herramienta de renderización para proporcionar una visión más real de la boquilla desarrollando un entorno favorecedor como se aprecia en la *Figura 30*.

Cabe destacar que, el plano de despiece de la boquilla presenta más claridad a las dimensiones y a los huecos interiores en el *Apéndice III*.

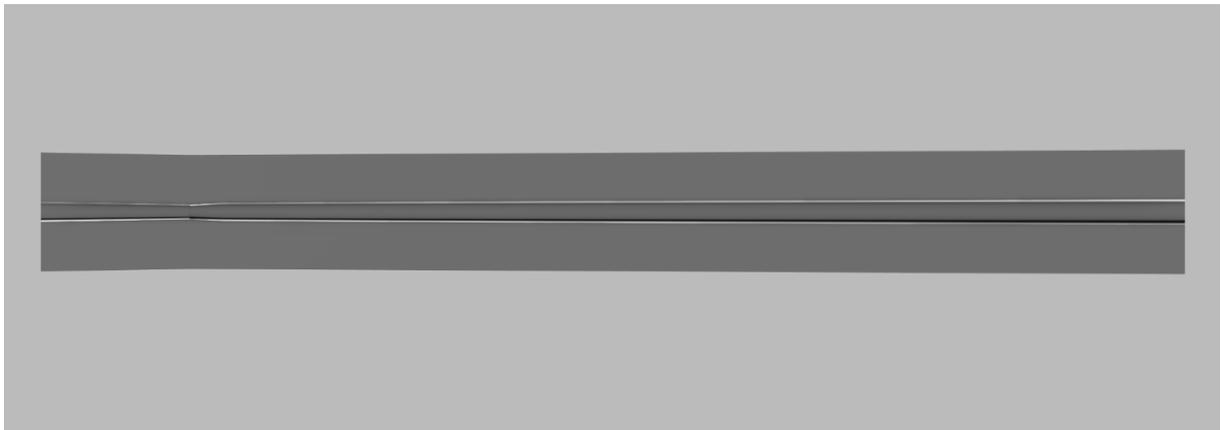


Figura 29. Diseño tridimensional de la sección longitudinal de la boquilla optimizada de proyección térmica para un diámetro de partícula de $25\ \mu\text{m}$ mediante el software Fusion 360.

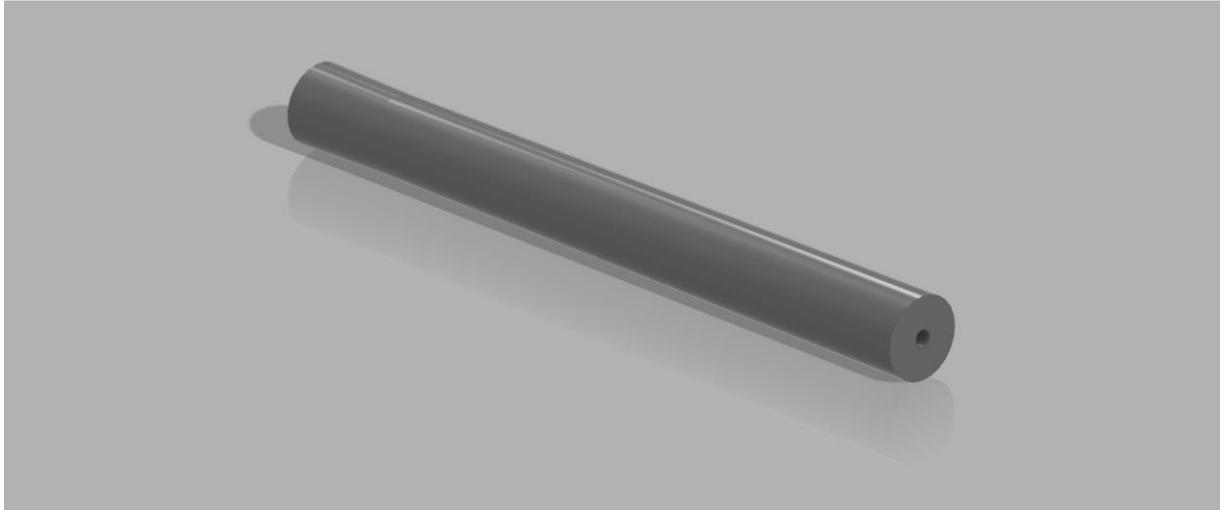


Figura 30. Diseño tridimensional de la boquilla optimizada de proyección térmica para un diámetro de partícula de 25 μm mediante el software Fusion 360.

5.5. DISCUSIÓN DE LOS MATERIALES COMPATIBLES CON LOS REQUERIMIENTOS EN USO DE LA BOQUILLA MEDIANTE GRANTA EDUPACK

5.5.1. Pautas de selección primarias

Los requerimientos que debe cumplir el material de la boquilla vienen determinados principalmente por su temperatura máxima en servicio, al trabajar con un proceso térmico, y su resistencia a la erosión por soportar constantemente el flujo de partículas en movimiento por el interior de la boquilla. Posteriormente se analizarán otros parámetros de interés con la ayuda de la herramienta Granta Edupack, cuyo software está formado por una base de datos sobre materiales y procesos junto a una serie de recursos de apoyo.

Para comenzar el proyecto de selección se restringen los materiales permitidos a los cerámicos, los compuestos, los metales y los polímeros en el Nivel 3 Aeroespacial al tratar con equipos cuya funcionalidad requiere estas propiedades.

La siguiente etapa está relacionada con la designación de un límite para la durabilidad de los materiales, indicando que la oxidación a 500 °C debe ser excelente, puesto que el equipo de proyección en frío se emplea con nitrógeno como gas portador, a una temperatura de estancamiento de 600 °C.

A continuación, se muestra en la *Figura 31* los materiales resultantes por zonas en una gráfica que representa la temperatura máxima en servicio frente a la dureza Vickers, haciendo referencia a la capacidad para soportar la erosión. De esta forma, el software permite el trazo de un cuadro de selección en la región relevante para determinar los materiales que pasarán a la próxima fase. La búsqueda de un rango de temperatura superior a los 600 °C que alcanza el proceso y valores elevados de dureza por encima de 1000 HV, conllevan a la maximización de ambos términos en los rangos descritos.

La etapa posterior adicional considera el límite elástico para evaluar el desgaste y las imperfecciones que puede sufrir interiormente la boquilla, ya que éste se define como la tensión máxima que puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Luego, se hace uso de los índices de rendimiento proporcionados por el software permitiendo una investigación más precisa de esta cualidad, de acuerdo con una ecuación a maximizar y la fijación de una serie de variables, así como un parámetro a optimizar. El resultado obtenido es la *Figura 32*, que representa el límite elástico frente a la estabilidad dimensional térmica cuyos datos quedan recogidos en el *Apéndice IV*, indicando la geometría y el flujo de calor como variables fijas. En este caso, el cuadro de selección permite maximizar ambas características por encima de 200 MPa, debido a que la boquilla requiere la mínima distorsión térmica y deformación.

Tras acotar los materiales que cumplan los requisitos impuestos se pasa a una etapa de selección gráfica (*Figura 33*) con la ayuda de otro índice de rendimiento referido al coste por unidad de fuerza de un cilindro sometido a presión interior, es decir, aquella provocada por el flujo de nitrógeno con polvo de

aluminio. El *Apéndice IV* detalla la ecuación a optimizar y las variables fijas seleccionadas para esta cuestión de estudio, tales como el radio y la resistencia. En referencia a la viabilidad económica del proyecto, se minimiza el coste de los materiales, seleccionando finalmente cuatro de ellos detallados en la *Tabla 8*.

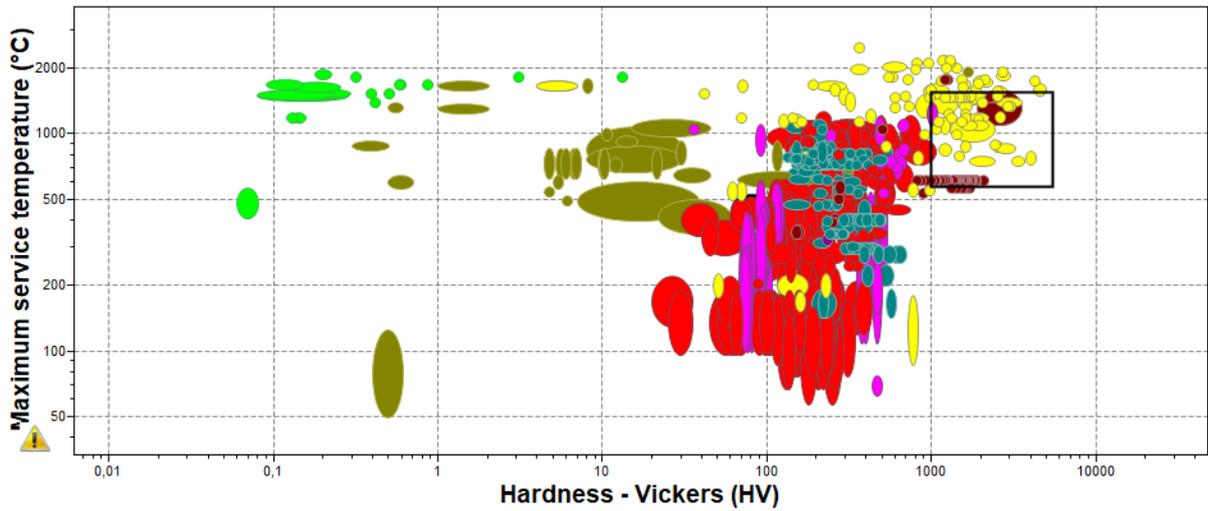


Figura 31. Representación gráfica de la temperatura máxima en servicio (°C) frente a la dureza Vickers (HV) de los conjuntos de datos en Granta EduPack.

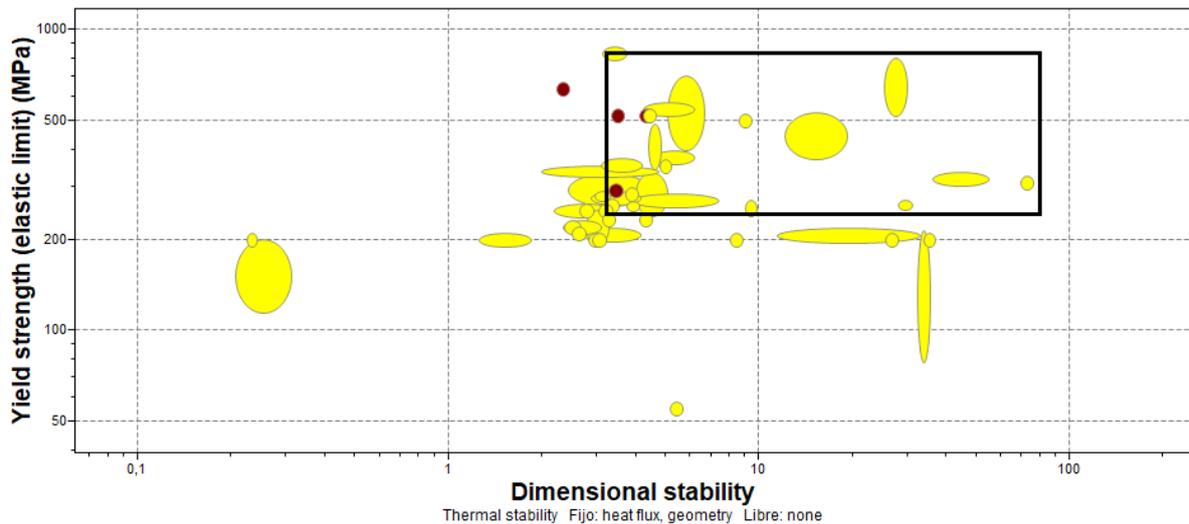


Figura 32. Representación gráfica por zonas del límite elástico (MPa) frente a la estabilidad dimensional térmica de los conjuntos de datos resultantes en Granta EduPack.

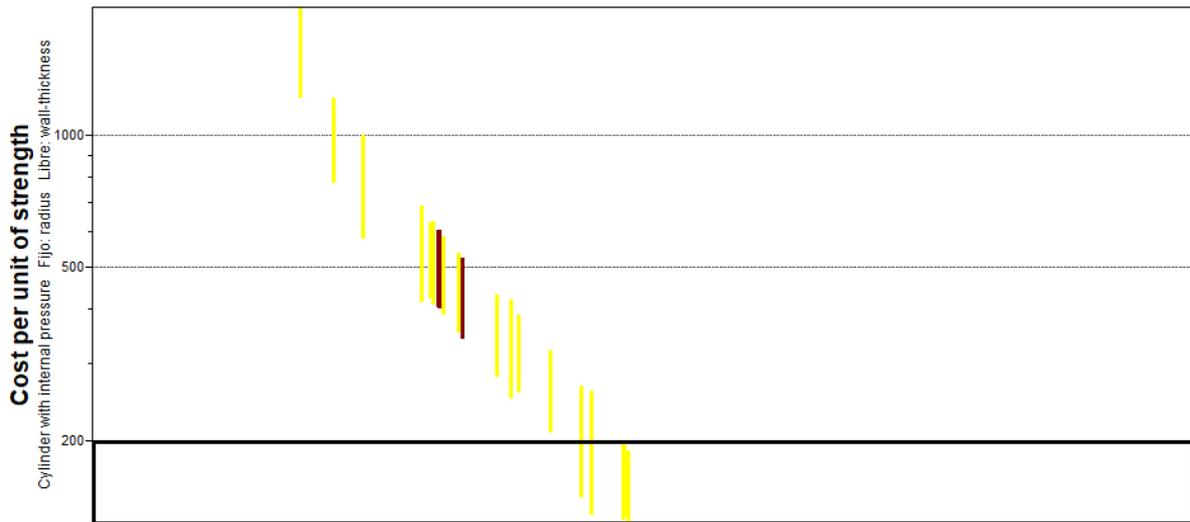


Figura 33. Representación gráfica del coste por unidad de fuerza para un cilindro sometido a presión interior en Granta EduPack.

Tabla 8. Resumen de los materiales que superan las etapas primarias de selección en Granta EduPack junto con ciertos datos.

Material cerámico	Precio (€/kg)	Máxima temperatura de servicio (°C)	Aplicaciones
Nitruro de silicio (5 % MgO)	32,9 – 50,2	1170 - 1230	Inyectores de combustible, turbinas de gas, revestimiento de tubos de escape, pistones, boquillas de soldadura, etc.
Alúmina (96 %)	17 – 25,5	1440 – 1510	Cojinetes, bujías, recubrimientos, herramientas de corte, revestimientos resistentes al desgaste, aislantes, etc.
Sialons (Si-Al-O-N)	25,1 – 36,7	1400 - 1500	Herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste, válvula de gas de alta temperatura, boquillas de inyección, etc.
Carburo de silicio	13,5 – 19,3	1470 - 1540	Pistones hidráulicos, piezas de válvula de gas de alta temperatura, etc.

5.5.2. Procesos de fabricación industrial

La elección final del material de la boquilla requiere de una estimación del coste por partes, incluyendo el proceso de fabricación que se emplea. Teniendo en consideración que los materiales preseleccionados en el anterior apartado se encuentran principalmente en forma de partículas, se investigó por medio de EduPack, aquellas técnicas que modelan piezas a partir de polvo cerámico.

Tabla 9. Resumen de los distintos procesos de fabricación a partir de polvo cerámico y sus características en Granta EduPack.

Proceso de fabricación	Coste del equipo necesario (M €)	Coste de fabricación (€/unidad)	Rango del espesor de la sección (mm)	Tolerancia (mm)	Fracción de material utilizado (%)
Prensado en caliente	1,14 - 2,46	35,6 - 145	5 - 500	0,2 - 0,5	90 - 99
Fundición deslizante	0,0018 - 0,0176	16,6 - 153	1 - 10	0,5 - 1,5	90 - 95
Prensado y sinterización	0,615 - 2,46	13,5 - 23,9	1,5 - 8	0,1 - 0,5	90 - 99
Prensado isostático en frío	0,0703 - 0,281	18,8 - 60,1	1 - 500	0,4 - 1	90 - 99
Prensado isostático en caliente a pequeña escala	0,105 - 0,352	90,1 - 779	2 - 250	0,5 - 1	80 - 95

Cabe destacar que, todos los procedimientos recogidos en este apartado cuentan con apoyo gráfico para explicar las técnicas en el *Apéndice V*.

A continuación, se procede a detallar en profundidad las características de cada proceso industrial y decidir aquel que mejor se adapte a las propiedades buscadas.

El prensado en caliente consiste en introducir el polvo cerámico en una matriz precalentada, con el perfil deseado, y aplicar la suficiente presión a la temperatura de sinterización para compactar correctamente las partículas. Esta técnica combina la compactación y la sinterización en una única etapa mejorando la porosidad, la resistencia y la ductilidad en comparación con el prensado isostático en frío y la posterior sinterización, pero aumentando el tiempo de procesado. Los principales inconvenientes son el elevado

precio de las matrices, las dificultades de calentamiento, el control de una presión uniforme en toda la pieza, el tiempo requerido para el ciclo y el diseño de geometrías simples sin huecos únicamente.

La fundición deslizante se basa en la preparación de una mezcla de arcilla, agua y polvo cerámico con baja viscosidad para fluir fácilmente al verterse en un molde poroso de yeso. El molde absorbe parte de esa agua y la mezcla forma una capa semidura sobre la superficie del molde. Una vez se alcanza el espesor suficiente, lo restante se vierte hacia el exterior y al secarse completamente se procede al sinterizado de la pieza. La fabricación de formas complejas con moldeos de superficies detallados es posible, así como el diseño de huecos y formas cilíndricas. Se suele aplicar en polvos finos de cerámica tales como el carburo de silicio y la alúmina, para la fabricación de piezas cerámicas delgadas y grandes, porcelana, compuestos de matriz cerámica y piezas cerámicas electrónicas (por ejemplo, aisladores de alto voltaje). No obstante, la tasa de producción es baja y el proceso es económico para pequeñas cantidades a causa de que el coste del molde y del equipamiento es bajo.

En el prensado y sinterización, los polvos cerámicos se prensan en un molde cerrado conformando una pieza denominada cuerpo verde con una forma determinada. Luego, se calienta a una temperatura justo por debajo del punto de fusión del material para unir las superficies de contacto de las partículas, produciendo la sinterización. El proceso es adecuado para cualquier tipo de material, incluso para mezclas complejas, pero se utiliza fundamentalmente en metales y cerámicos. Además, el coste del molde dependerá de la complejidad, el número de cavidades y su dimensión, limitando la tasa de producción. Aunque, este proceso de fabricación es económico para piezas que precisan formas extremadamente complejas, donde el espesor de la pared varía en un rango muy amplio. Las aplicaciones típicas son filtros, reguladores de presión, rotores de bombas, pequeños engranajes, levas, herramientas de corte, materiales antifricción, componentes eléctricos y magnéticos, etc.

El prensado isostático en frío se caracteriza por la utilización de un molde de caucho flexible que se somete a una presión isostática de hasta 400 MPa a través de un fluido hidráulico. Al igual que la fundición deslizante, se precisa de un sinterizado a continuación del prensado para incrementar la densidad y mejorar las propiedades mecánicas. A pesar de que, la propia compactación uniforme del prensado isostático en frío produce estructuras con granos y densidad homogéneas, para formas complejas y componentes con relaciones de longitud-diámetro altas. Las formas largas, esbeltas y con huecos son prácticas. Ampliamente usada en cerámicos, largos cilindros huecos esbeltos, aisladores de bujías y en boquillas convergente-divergente. Además, el coste de la herramienta permite su utilización para cualquier tipo de complejidad en las piezas a fabricar.

En el prensado isostático en caliente, el polvo se sella en un contenedor metálico deformable sometido a elevadas presiones y temperaturas rodeado por un horno, utilizando el argón como medio de presurización. La característica más relevante es la producción de componentes con un 100 % de densidad, que cuentan con unas propiedades isotrópicas uniformes, lo que se traduce en un coste

relativamente caro, usado principalmente en aplicaciones donde la integridad del material es primordial como en la industria aeroespacial. Se emplea fundamentalmente en metales y cerámicos, permitiendo el procesamiento de todas las formas, a excepción de huecos cerrados.

En conclusión, se destaca que el presupuesto económico de aquellos procesos que precisan de una sinterización adicional como postratamiento se eleva considerablemente. De manera que, la fundición deslizante no es de interés puesto que las tolerancias son bastante amplias, tiene aplicaciones comerciales muy limitadas y se requiere un sinterizado posterior habitual. También ocurre con el prensado isostático en frío a pesar de ser el procedimiento por excelencia para la creación de boquilla convergente-divergente. El prensado isostático en caliente a pequeña escala presenta las mejores propiedades mecánicas, de densidad e integridad del material y combina el prensado y la sinterización en un solo paso, no obstante, también es el proceso con el mayor presupuesto, encontrándose bastante por encima del resto.

Finalmente, se considera el prensado y la sinterización para la fabricación por ser un proceso combinado de una sola etapa, económico basándose en las dimensiones de la boquilla, adecuado para cualquier material y forma compleja, mientras que el prensado en caliente está limitado a piezas con geometría simples que no conllevan ningún tipo de hueco, contrario al caso en desarrollo. Asimismo, tanto la tolerancia como la fracción de material utilizado entre ambos son muy similares.

5.5.3. Estimación del coste respecto al material y proceso de fabricación

Una cuestión importante a evaluar es el coste completo del mecanismo industrial y los materiales. Para ello, se emplea la herramienta “Synthesizer” del software Granta EduPack que cuenta con una subsección denominada “Part Cost Estimator” destinada al diseño conceptual de la etapa inicial cuando todavía se consideran varios materiales y no se han definido los detalles del diseño.

Los detalles del componente serán los mismos para cada uno de los cuatros materiales preseleccionados con anterioridad y poder observar claramente cuál es su tendencia. Entonces, se elige un material de desecho del 5% puesto que es un valor intermedio para la fracción de material no utilizado del prensado y la sinterización, una masa de la boquilla de 0,02 kg que se asemeja al peso de las boquillas comerciales observadas, una longitud de la pieza de 0,23 m previamente diseñada y, un tamaño del lote en un rango entre 10 - 100 boquillas al tratarse de un componente para uso de investigación. Luego, se define el proceso de conformado primario sobre la base de la anterior sección para el prensado y la sinterización, con una complejidad de la pieza estándar al tener que modelar las zonas convergente-divergente, unos gastos generales de 140 €/h predeterminados por el programa y un tiempo de amortización del capital de 10 años. El proceso de conformación secundario no se rellena al no necesitar una post-sinterización. El *Apéndice VI* ilustra la aplicación de esta herramienta.

El coste por pieza de las cuatro cerámicas representa una tendencia decreciente respecto al tamaño del lote desde 10 hasta 100 piezas en la *Figura 34* sin una variación significativa entre ellas, excepto una reducción conjunta del precio total a medida que se aumenta el tamaño del lote, siendo la más económica la fabricación de 100 boquillas. Esta evolución concuerda con la disminución de los elevados gastos iniciales de maquinaria y utillaje al contar con pedidos de mayor volumen, ya que el coste por pieza se reduce. También, la fabricación de componentes más personalizados limita la productividad y ocasiona mayores cronologías de producción.

La *Figura 35* muestra una ampliación de los resultados más detallada para un lote de 100 boquillas, pudiendo observar el menor coste para el carburo de silicio y la alúmina al 96 % de pureza, materiales cerámicos que pasarán a la última etapa de selección.

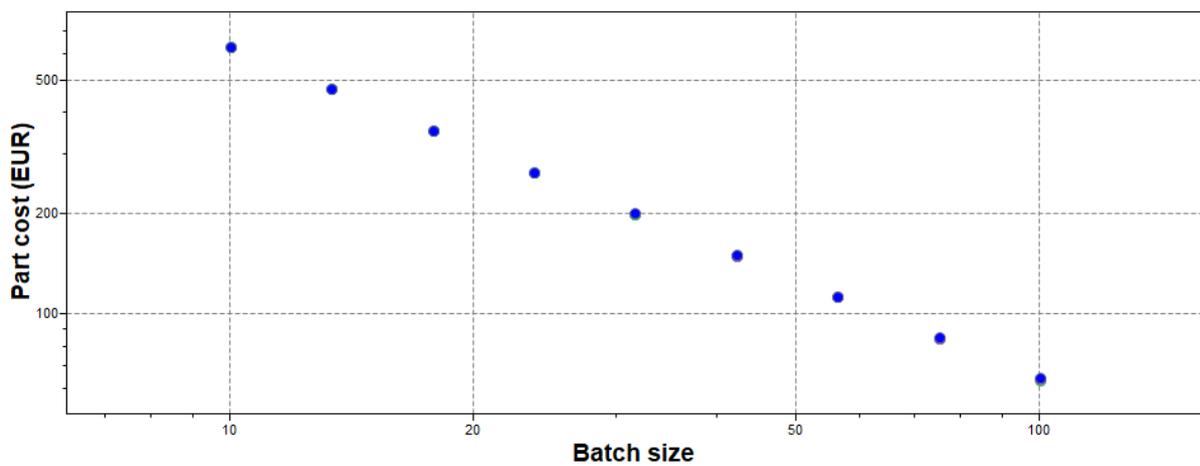


Figura 34. Representación del coste por partes (€) frente al tamaño de lote desde 1 hasta 100 piezas mediante la herramienta “Part Cost Estimator” de EduPack.

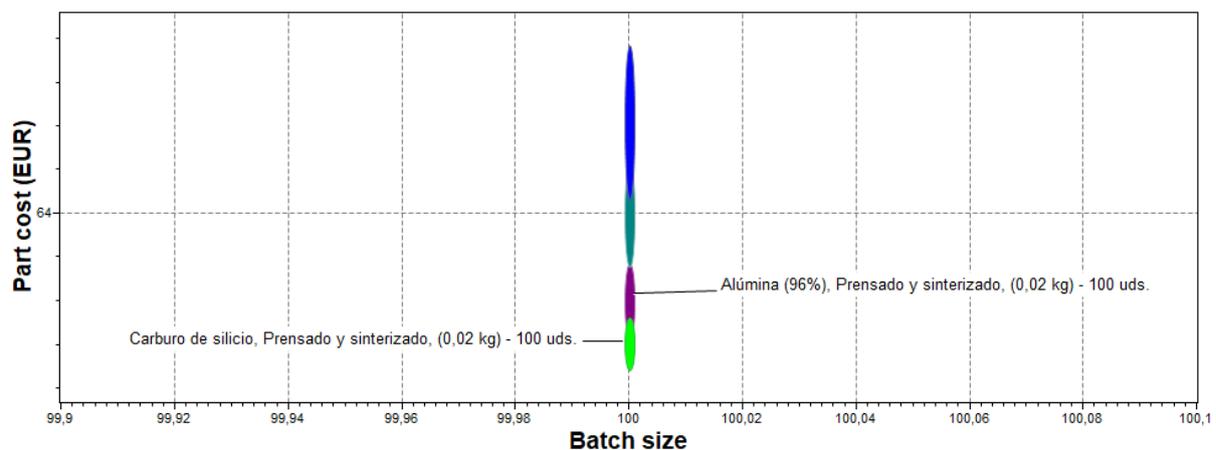


Figura 35. Ampliación de la representación del coste por partes (€) frente al tamaño de lote para 100 piezas mediante la herramienta “Part Cost Estimator” de EduPack.

5.5.4. Evaluación del impacto ambiental

La aplicación “Eco Audit” permite identificar qué parte del ciclo de vida de un producto es predominante en términos de impacto ambiental, realizando una comparación entre múltiples productos.

Las características implementadas tanto para la alúmina como para el carburo de silicio son las mismas, ya que se busca estimar el efecto real de los materiales principalmente. Se parte de la fabricación de 100 unidades para un material virgen, es decir, con un 0% de contenido reciclado, cuyo fin de vida será la refabricación que está recomendada para ambos elementos y, un proceso primario de prensado y sinterización como se estableció anteriormente. El transporte de las boquillas de proyección en frío será por medio de una aeronave de corta distancia dedicada únicamente al transporte de mercancías desde Francia a 1555 km, donde se localiza la empresa distribuidora de los polvos conocida como “Final Advanced Materials” especializada en cerámica técnica industrial. Se supone que emplea energía eléctrica de forma estática con una potencia nominal de 3,3 kW al trabajar con el equipo de proyección en frío DYMET 423.

Tras la introducción de estos datos, se obtienen la *Figura 36* y *37*, que representan la huella de CO_2 generada y la energía consumida en cada una de las fases del proceso de producción, respectivamente. El porcentaje de diferencia total entre las boquillas de alúmina y carburo de silicio es nulo, aun cuando las contribuciones del material, la fabricación y el potencial de fin de vida difieren. En el caso de la *Figura 36*, la huella de CO_2 es superior para el carburo de silicio, pero en cuestión de fabricación y potencial de vida es inferior, por lo que se puede llegar a la solución de que se compensan mutuamente. La energía requerida sigue una disposición similar que la huella de CO_2 , por lo cual ambos materiales tienen el mismo impacto ambiental.

Finalmente, se selecciona la fabricación de la boquilla de proyección en frío de carburo de silicio, puesto que es más económica que la alúmina y presenta muy buenas propiedades para la puesta en marcha y el ciclo de vida del producto. Sin distar en gran medida de las boquillas más comercializadas de los equipos LPCS, cuyo material utilizado generalmente es la alúmina.

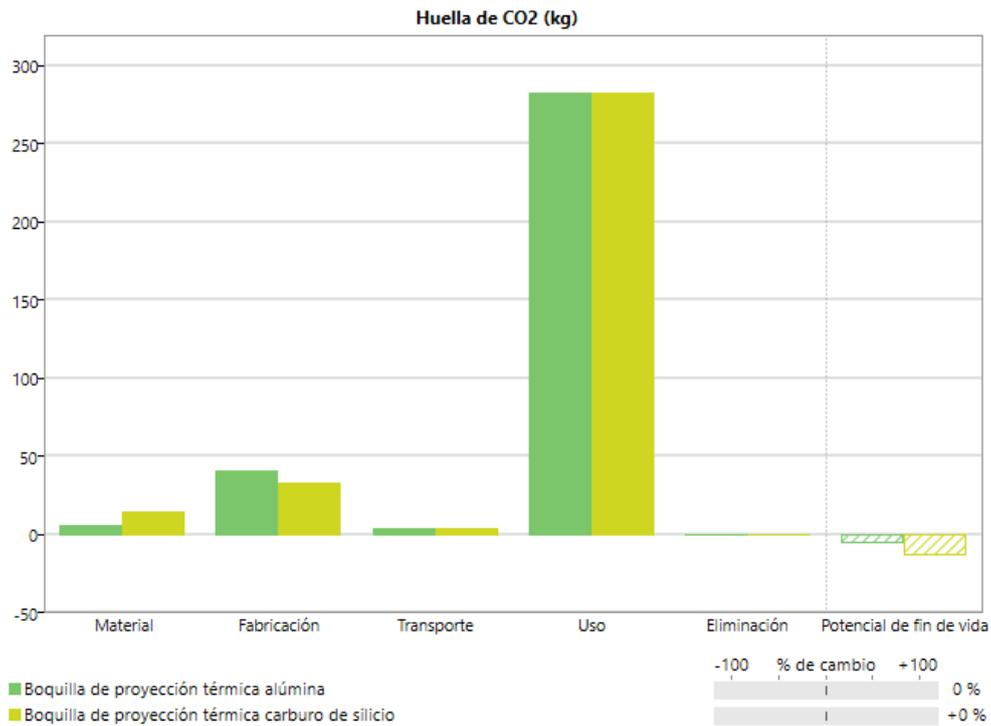


Figura 36. Diagrama de barras sobre la huella de CO₂ (kg) generada en cada uno de los procesos de producción en contraste para una boquilla de proyección en frío de alúmina y carburo de silicio.

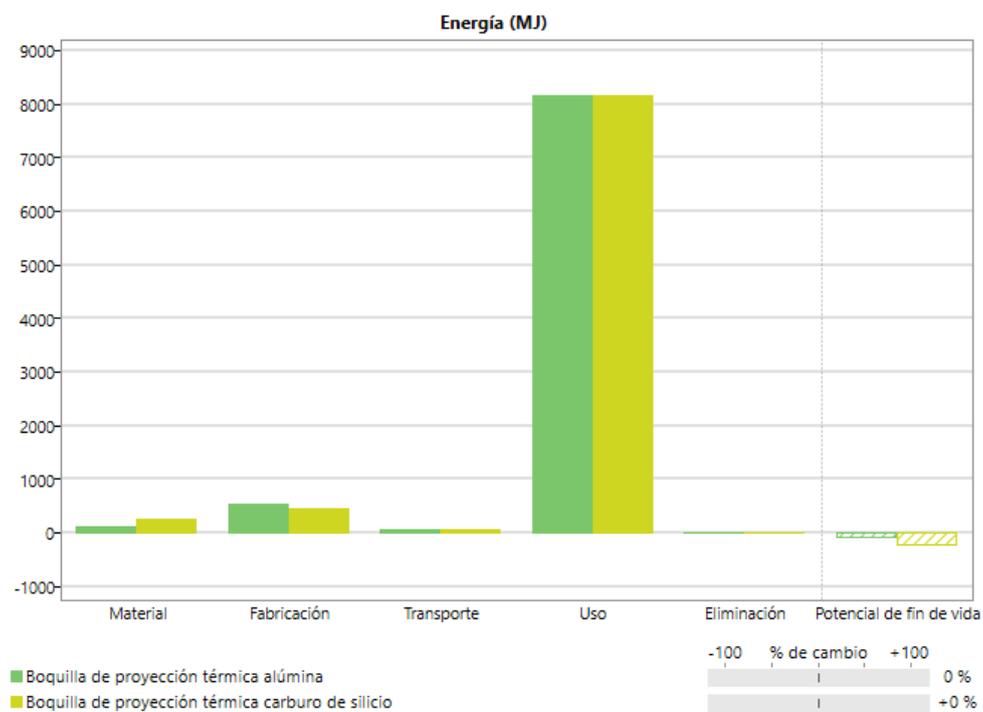


Figura 37. Diagrama de barras sobre la energía (MJ) requerida en cada uno de los procesos de producción en contraste para una boquilla de proyección en frío de alúmina y carburo de silicio.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo se basa en el diseño de una boquilla de proyección térmica para la deposición de aluminio desarrollado a través de un nuevo modelo de optimización basado en la teoría isoentrópica unidimensional formulada con el método de los multiplicadores de Lagrange. La comparación frente a los modelos tradicionales y las boquillas utilizadas comercialmente, muestra que el modelo desarrollado maximiza la velocidad de salida de la partícula y optimiza la geometría divergente de la boquilla.

Las variables de entrada que determinan la simulación se han delimitado por una serie de mapas de interés que optimizan la velocidad de salida. En primer lugar, el aumento de la longitud divergente conlleva un incremento de la velocidad hasta un estado crítico de 200 mm, donde disminuye considerablemente por el efecto negativo de una fuerza de arrastre baja. La velocidad en la garganta de la boquilla está influenciada por cada diámetro de las partículas, cuyo cálculo en este trabajo supone su mayor aproximación al perfil divergente óptimo. En un principio, la velocidad de salida de las partículas dispone de una relación de crecimiento respecto a condiciones de estancamiento superiores de presión y temperatura. A pesar de ello, las temperaturas más elevadas se encuentran limitadas por el deterioro de la unión, el espesor y las propiedades mecánicas, definiendo de esta forma unas condiciones de estancamiento de 600 °C y 12 bar para lograr un recubrimiento exitoso con un equipo de baja presión.

El perfil de la geometría óptima divergente depende del material, densidad y tamaño del polvo a depositar. Las partículas más ligeras, es decir, las más pequeñas alcanzarán velocidades de salida elevadas, pero darán lugar a diámetros finales de la boquilla más amplios a causa de la sobreestimación de la fuerza de arrastre y consecuentemente, el número de Mach óptimo. Esta particularidad concluye la similitud de la geometría óptima y el correspondiente perfil de velocidades de las partículas para tamaños superiores, precisando mejores resultados en diámetros a partir de 20 μm . El cálculo posterior de las pérdidas respecto a la velocidad de salida entre el modelo clásico y la nueva metodología consolida la tendencia geométrica mencionada y un valor mínimo de 0,02 %, determinando un tamaño de partícula de 25 μm apropiado para esta forma de boquilla única con longitud divergente de 200 mm, material y condiciones de estancamiento. También, se admite la superación de la velocidad crítica dispuesta para el tamaño definitivo, ya que al incrementar las dimensiones de las partículas este límite analítico disminuye.

La etapa final de la implementación en la industria de la boquilla de proyección en frío requiere de la selección del material y el proceso de fabricación que se utilizará. Finalmente, se dispone de un material cerámico conocido como carburo de silicio fabricado por medio del prensado y la sinterización que minimiza el impacto ambiental y el coste tanto del material como del proceso, cumpliendo con las propiedades preestablecidas térmicas, abrasivas y plásticas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. F. SMITH: Introduction to Cold Spray. En: *High Pressure Cold Spray-Principles and Applications*, Sandia National Laboratories (2016)
- [2] FORERO-SOSSA, PAOLA ANDREA; GIRALDO-BETANCUR, ASTRID LORENA; POBLANO-SALAS, CARLOS A.; GUTIERREZ-PÉREZ, AIXA IBETH; RODRÍGUEZ-VIGUERAS, ESAÚ MOISES; CORONA-CASTUERA, JORGE; HENAO, JOHN: Nozzle Geometry and Particle Size Influence on the Behavior of Low Pressure Cold Sprayed Hydroxyapatite Particles. En: *Coatings* (2022), Vol. 12, pp. 1-15
- [3] MARTÍNEZ-FLORES, MÓNICA; CERVANTES-CABELLO, JOSÉ JAVIER; BARBA-PINGARRÓN, ARTURO: Low-Pressure Cold Spray Deposition Window Derived from a One-Dimensional Analytical Model. En: *Coatings* (2023), Vol. 13, pp. 1-17
- [4] HENAO PENENREY, JOHN DAIRO; FORERO SOSSA, PAOLA ANDREA; GIRALDO BETANCUR, ASTRID LORENA; POBLANO SALAS, CARLOS; CORONA CASTUERA, JORGE: La proyección en frío como alternativa para la fabricación de recubrimientos de nueva generación. En: *Temas de Ciencia y Tecnología* (2022), Vol. 26, Núm. 78, pp. 41-50
- [5] KUMAR, SANTOSH; KUMAR, MANOJ; JINDAL, NEERU: Overview of cold spray coatings applications and comparisons: a critical review. En: *World Journal of Engineering* (2020), Vol. 17, pp. 27–51
- [6] POZA, PEDRO; GARRIDO-MANEIRO, MIGUEL ÁNGEL: Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour. En: *Progress in Materials Science* (2022), Vol. 123, pp. 1-35
- [7] DYKHUIZEN, R C; SMITH, M F: Gas Dynamic Principles of Cold Spray. En: *Journal of Thermal Spray Technology* Vol. 7 (1998), pp. 205-212
- [8] VADLA, SAI RAJKUMAR; DOOM, JEFFREY: Analysis of Jet Characteristics Among Various Cold Spray Nozzles. En: *Journal of Thermal Spray and Engineering* Vol. 1 (2018), pp. 24–31
- [9] SIRVENT, PALOMA; GARRIDO, MIGUEL A.; MÚÑEZ, CLAUDIO J.; POZA, PEDRO; VEZZÙ, SIMONE: Effect of higher deposition temperatures on the microstructure and mechanical properties of Al 2024 cold sprayed coatings. En: *Surface and Coatings Technology* (2018), Vol. 337, pp. 461–470
- [10] ALONSO, L.; GARRIDO-MANEIRO, M. A.; POZA, P.: A study of the parameters affecting the particle velocity in cold-spray: Theoretical results and comparison with experimental data. En: *Additive Manufacturing* (2023), Vol. 67, pp. 1-11

- [11] SCHMIDT, TOBIAS; GÄRTNER, FRANK; ASSADI, HAMID; KREYE, HEINRICH: Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. En: *Acta Materialia* (2006), Vol. 54, pp. 729–742
- [12] ALONSO, L.; GARRIDO, M. A.; POZA, P.: An optimisation method for the cold-spray process: On the nozzle geometry. En: *Materials and Design* (2022), Vol. 214, pp. 1-12
- [13] KAMARAJ, M.; RADHAKRISHNAN, V. M.: Cold Spray Coating Diagram: Bonding Properties and Construction Methodology. En: *Journal of Thermal Spray Technology* (2019), Vol. 28, pp. 756–768
- [14] HASSANI-GANGARAJ, MOSTAFA; VEYSSET, DAVID; CHAMPAGNE, VICTOR K.; NELSON, KEITH A.; SCHUH, CHRISTOPHER A.: Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray. En: *Acta Materialia* (2018), Vol. 158, pp. 430–439
- [15] SCHREIBER, JEREMY M: *FINITE ELEMENT IMPLEMENTATION OF THE PRESTON-TONKS-WALLACE PLASTICITY MODEL AND ENERGY BASED BONDING PARAMETER FOR THE COLD SPRAY PROCESS*; The Pennsylvania State University (2016), pp. 1-169
- [16] SCHREIBER, J. M.; SMID, I.; EDEN, T. J.; KOUDELA, K.; COTE, D.; CHAMPAGNE, V.: Cold spray particle impact simulation using the Preston-Tonks-Wallace plasticity model. En: *Finite Elements in Analysis and Design* (2021), Vol. 191, pp. 1-10
- [17] SINGH, SURINDER; RAMAN, R. K.SINGH; BERNDT, CHRISTOPHER C.; SINGH, HARPREET: Influence of cold spray parameters on bonding mechanisms: A review. En: *Metals* (2021), Vol. 11, pp. 1-26
- [18] LIMA, R S; KARTHIKEYAN, J; KAY, C M; LINDEMANN, J; BERNDT, C C: *Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings* (2002), Vol. 416, pp. 129-135
- [19] HUSSAIN, T.; MCCARTNEY, D. G.; SHIPWAY, PHILIP H.; ZHANG, D.: Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components. En: *Journal of Thermal Spray Technology* (2009), Vol. 18, pp. 364-379
- [20] YIN, SHUO; CAVALIERE, PASQUALE; ALDWELL, BARRY; JENKINS, RICHARD; LIAO, HANLIN; LI, WENYA; LUPOI, ROCCO: Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. En: *Additive Manufacturing* (2018), Vol. 21, pp. 628-650
- [21] LUPOI, R.; O’NEILL, W.: Powder stream characteristics in cold spray nozzles. En: *Surface and Coatings Technology* (2011), Vol. 206, pp. 1069–1076

- [22] VILLA, M.; DOSTA, S.; FERNÁNDEZ, J.; GUILMANY, J. M.: La proyección fría (CGs): Una alternativa a las tecnologías convencionales de deposición. En: *Revista de Metalurgia* (2012), Vol. 48, pp. 175–191
- [23] SILVELLO, A.; CAVALIERE, P.; RIZZO, A.; VALERINI, D.; DOSTA PARRAS, S.; GARCIA CANO, I.: Fatigue Bending Behavior of Cold-Sprayed Nickel-Based Superalloy Coatings. En: *Journal of Thermal Spray Technology* (2019), Vol. 28, pp. 930–938
- [24] YIN, SHUO; MEYER, MORTEN; LI, WENYA; LIAO, HANLIN; LUPOI, ROCCO: Gas Flow, Particle Acceleration, and Heat Transfer in Cold Spray: A review. En: *Journal of Thermal Spray Technology* (2016), Vol. 25, pp. 874-896
- [25] ROLAND CLIFT; JOHN R. GRACE; MARTIN E. WEBER: *Bubbles, Drops, and Particles*: Courier Corporation, 2005
- [26] GRUJICIC, M.; TONG, C.; DEROSSET, W. S.; HELFRITZ, D.: Flow analysis and nozzle-shape optimization for the cold-gas dynamic-spray process. En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (2003), Vol. 217, pp. 1603–1613
- [27] YIN, SHUO; ZHANG, MENG; GUO, ZHIWEI; LIAO, HANLIN; WANG, XIAOFANG: Numerical investigations on the effect of total pressure and nozzle divergent length on the flow character and particle impact velocity in cold spraying. En: *Surface and Coatings Technology* (2013), Vol. 232 pp. 290–297
- [28] LI, WEN YA; LIAO, HANLIN; WANG, HONG TAO; LI, CHANG JIU; ZHANG, GA; CODDET, C.: Optimal design of a convergent-barrel cold spray nozzle by numerical method. En: *Applied Surface Science* (2006), Vol. 253, pp. 708–713

8. APÉNDICES

APÉNDICE I: Datos adicionales en la variación del tamaño de partícula

El número de Mach óptimo para cada diámetro de partícula de la *Figura 38* expone la misma tendencia acerca de la sobreestimación para las partículas más pequeñas al estar directamente relacionada con la fuerza de arrastre señalada en la *Figura 41*, afianzando su utilización para tamaños de partícula superiores. Por consiguiente, las ecuaciones otorgadas por el modelo óptimo para el cálculo del número de Mach concuerdan con el resultado visible en la *Figura 40*, verificando un mayor radio máximo que cumple la restricción angular a medida que se disminuye el tamaño de partícula, es decir, con el incremento del número de Mach óptimo.

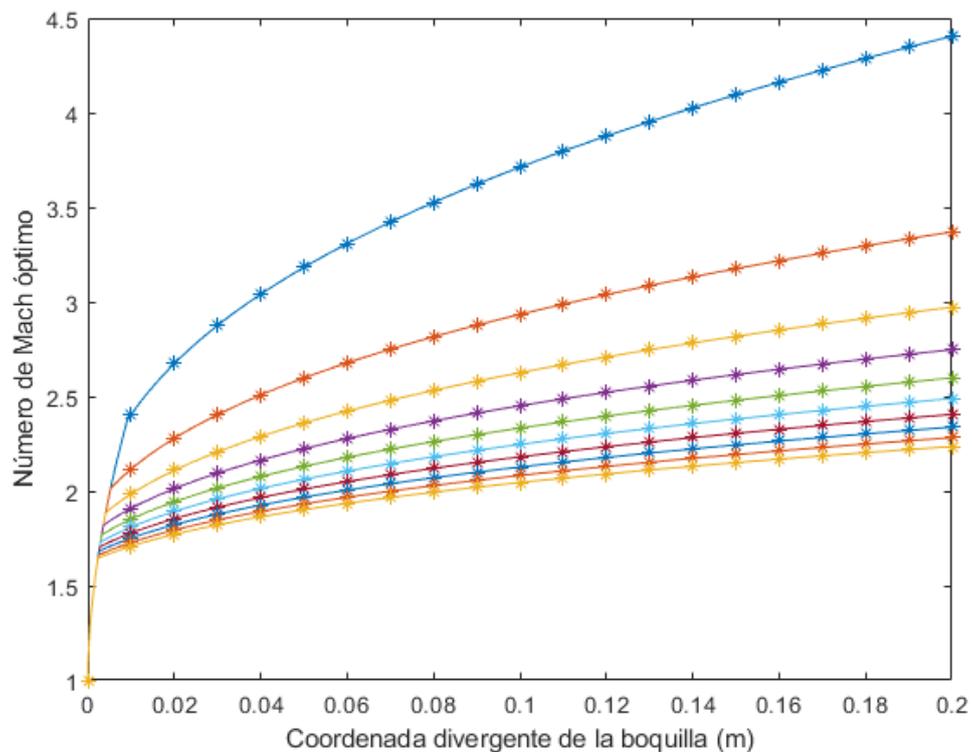


Figura 38. Perfil del número de Mach óptimo a lo largo de la coordenada axial de la boquilla (m) desde un diámetro de partícula de 5 hasta 50 μm.

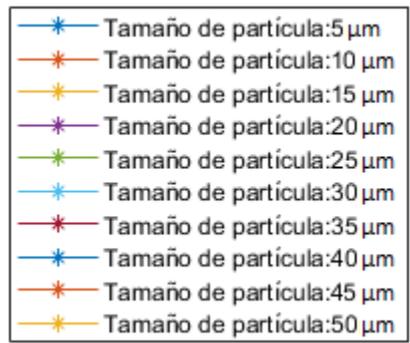


Figura 39. Leyenda de la Figura 38.

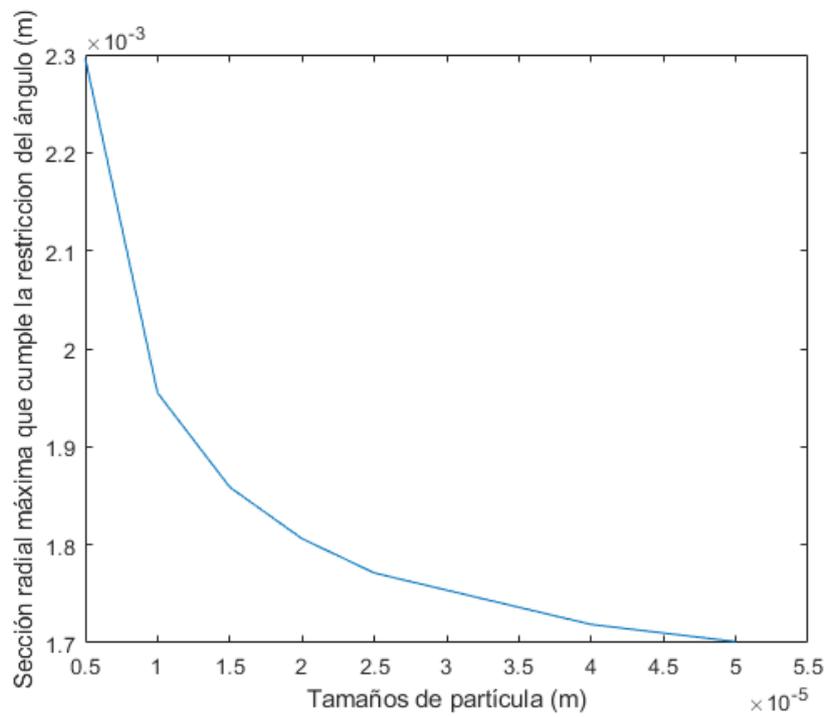


Figura 40. Radio máximo (m) que cumple la restricción angular frente a distintos diámetros de partícula (m).

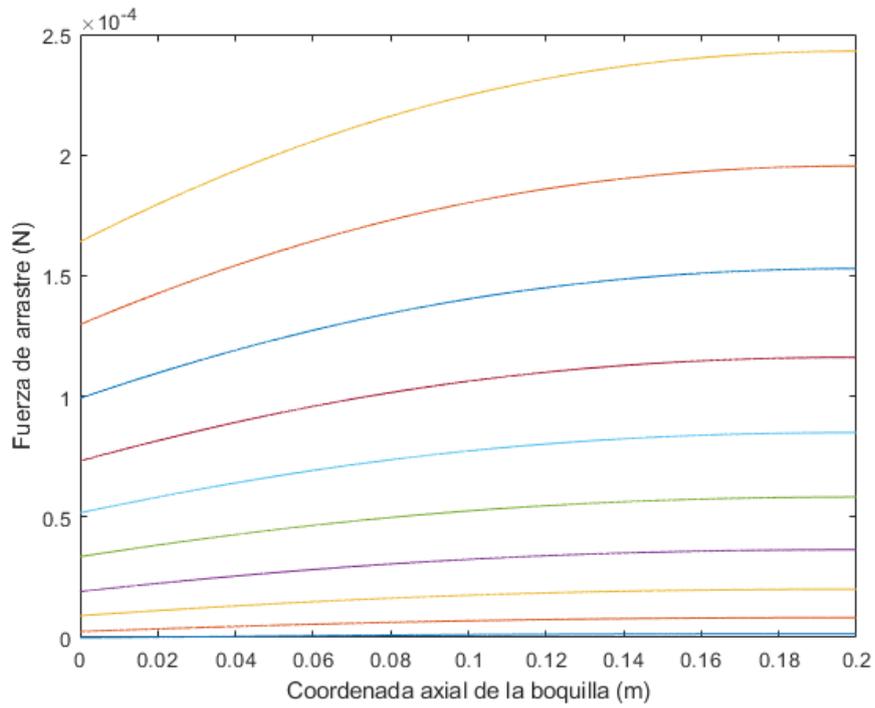


Figura 41. Perfil de la fuerza de arrastre (N) a lo largo de la coordenada axial de la boquilla (m) desde un diámetro de partícula de 5 hasta 50 μm .

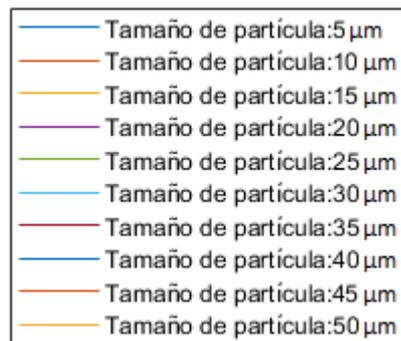


Figura 42. Leyenda de la Figura 41.

APÉNDICE II: Procedimiento de modelado de la boquilla mediante Fusion 360

La introducción de las coordenadas pertenecientes a la geometría completa de la boquilla se llevó a cabo mediante la opción de “Secuencias de comandos y complementos” que cuenta con el script denominado “ImportSplineCSV” reflejado en la *Figura 43* capaz de convertir los datos delimitados por comas, es decir, en formato CSV a un perfil de puntos unidos para el boceto.

Tras la importación, se puede observar en la *Figura 45* el dibujo del perfil de la sección longitudinal de la boquilla con la ayuda del radio de empalme en la cara externa (*Figura 44*), para a continuación proceder a la utilización de la herramienta “Revolución” (*Figura 46*) especificando el eje y ángulo de giro, para obtener el sólido de la *Figura 47* con un espesor de 1 cm junto con la geometría interior calculada en la simulación de este trabajo.

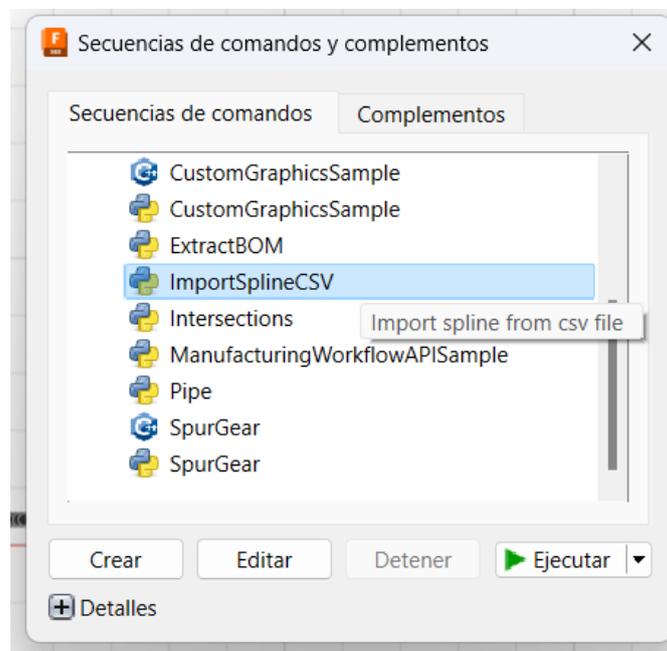


Figura 43. Recorte del comando Import Spline CSV en Fusion 360.

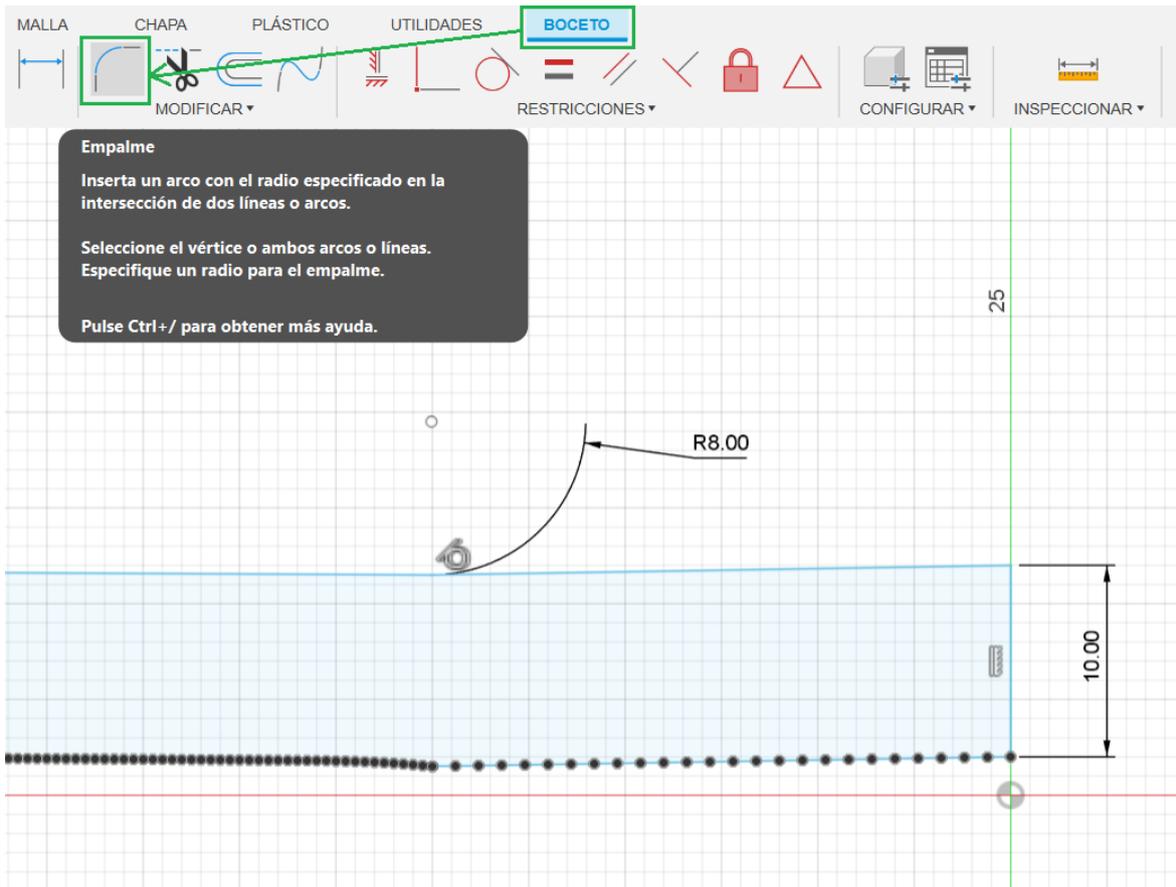


Figura 44. Recorte de la herramienta “Empalme” respecto al boceto de la sección longitudinal de la boquilla diseñada en Fusion 360.

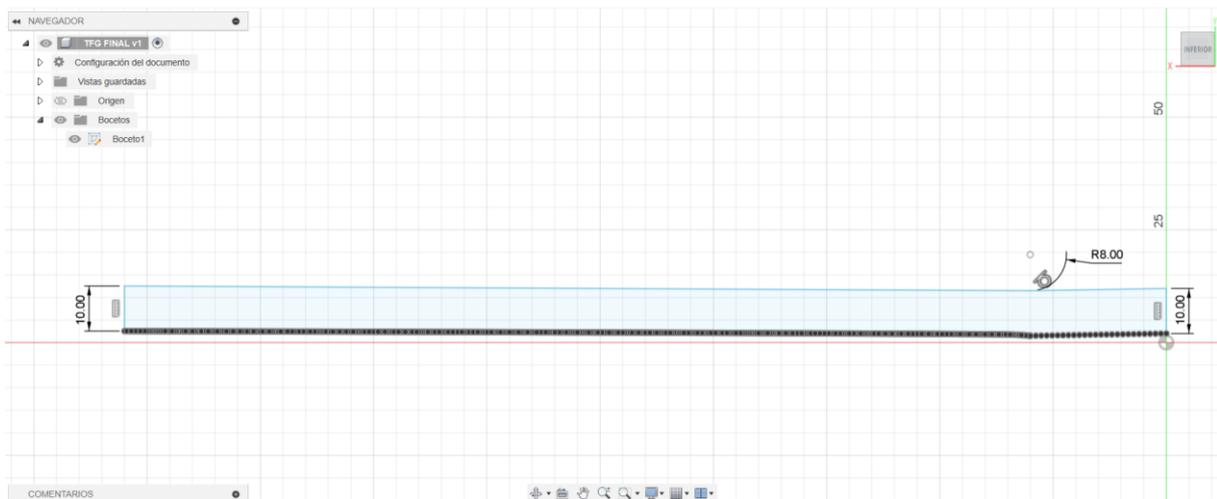


Figura 45. Recorte del boceto de la sección longitudinal de la boquilla diseñada en Fusion 360.

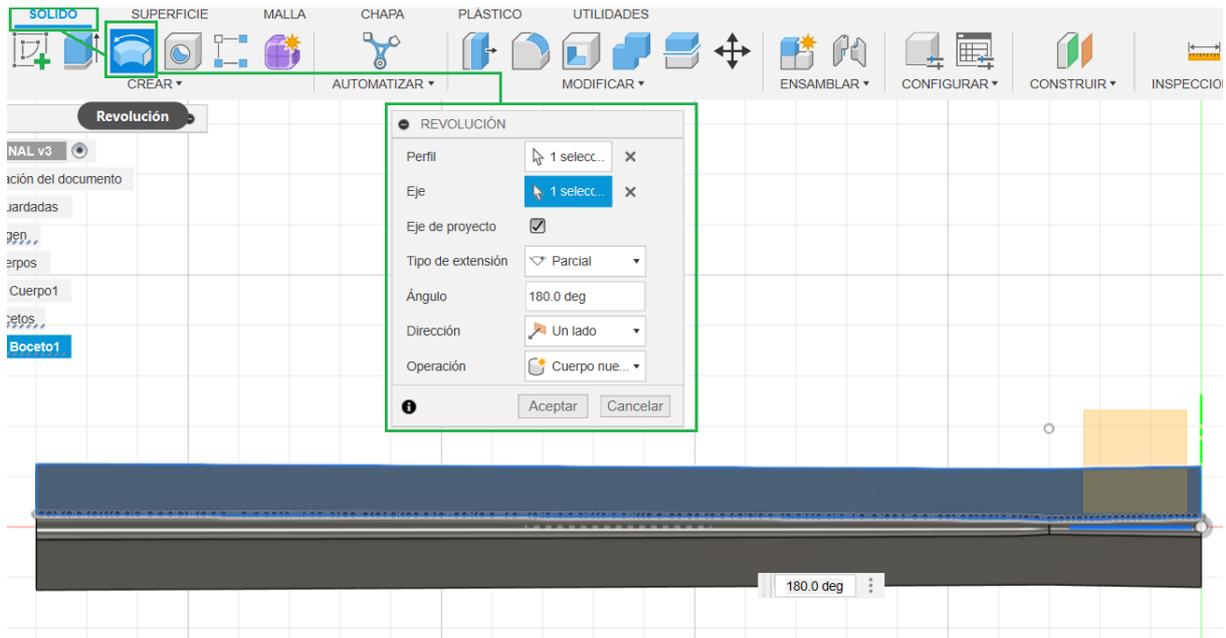


Figura 46. Recorte de la boquilla de proyección en frío durante la fase de “Revolución” con un ángulo de giro de 180° del boceto en Fusion 360.

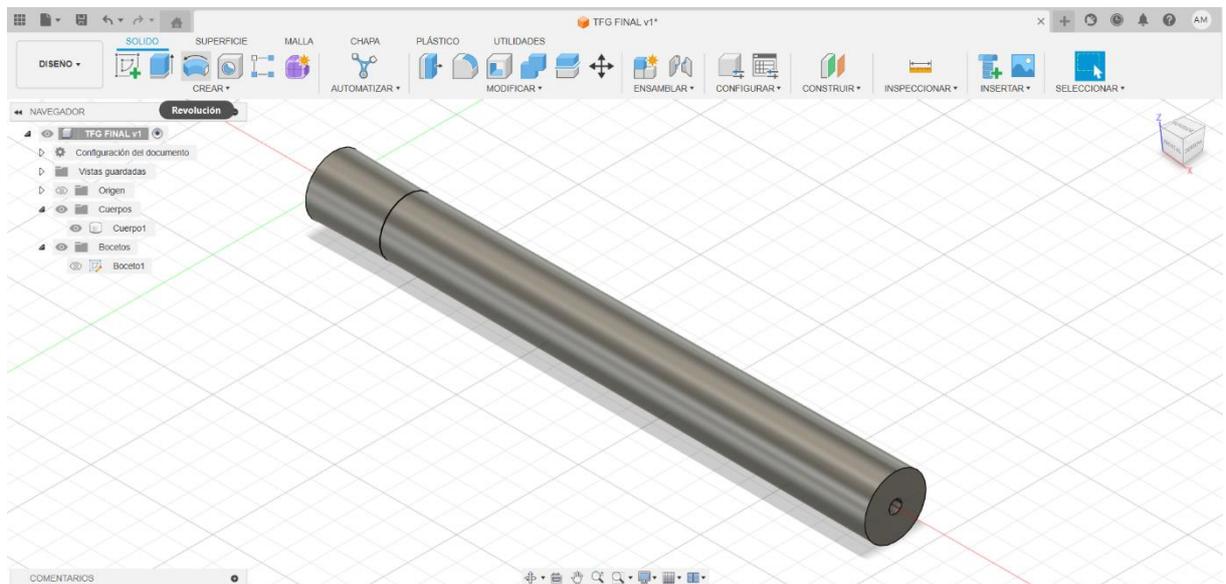


Figura 47. Recorte de la boquilla de proyección en frío tras la revolución del boceto en Fusion 360.

APÉNDICE III: Plano de despiece de la boquilla

El plano de despiece junto con las cotas de la boquilla señala las principales dimensiones a tener en cuenta durante su proceso de fabricación.

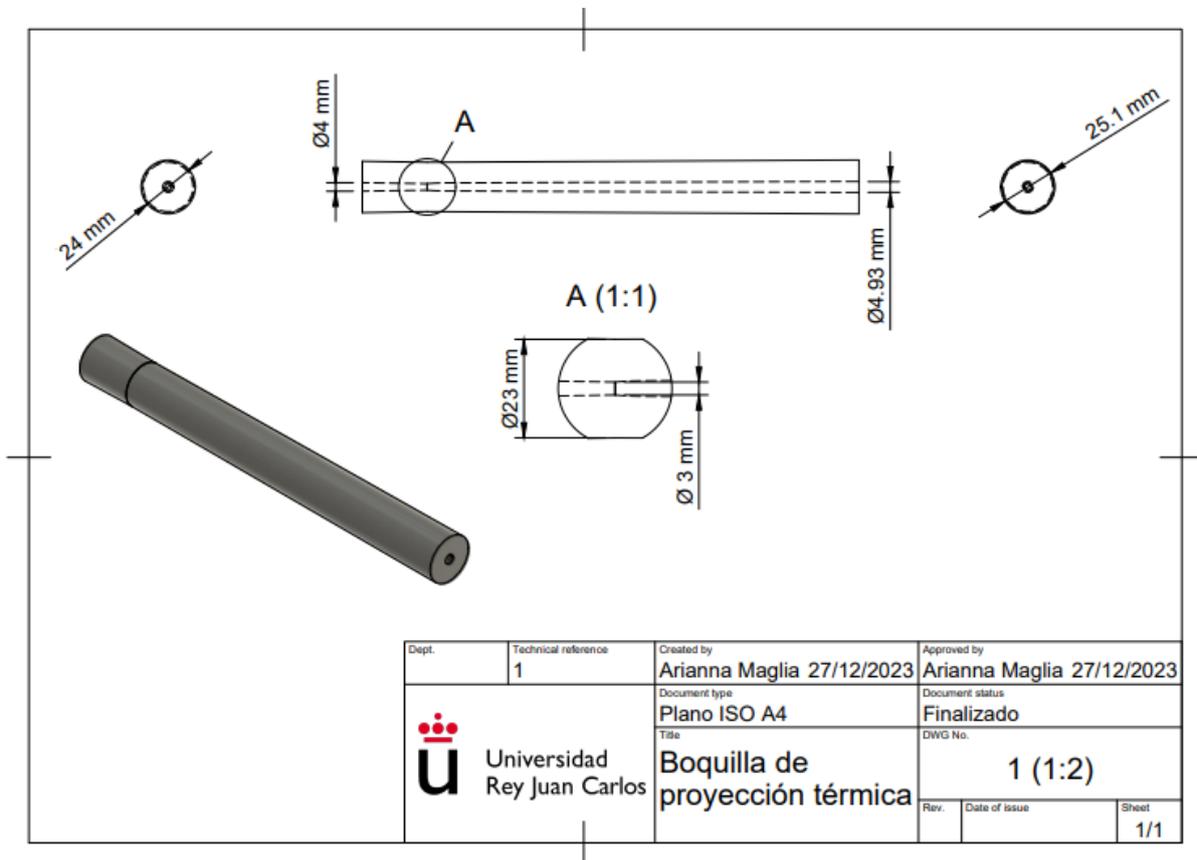


Figura 48. Plano de despiece ISO A4 de la boquilla de proyección térmica para materiales de baja densidad con sus respectivas dimensiones desarrollado en Fusion 360.

APÉNDICE IV: Índices de rendimiento

Los índices de rendimiento especifican los requerimientos necesarios para minimizar o maximizar ciertas propiedades mediante el desarrollo de fórmulas.

La estabilidad dimensional térmica proporciona directamente las variables limitantes en el proceso, sin conceder acceso a su modificación e impuestas por el software EduPack. La *Figura 49* recopila la fórmula a maximizar, al igual que la geometría y el flujo de calor como variables fijas junto con la restricción de la desviación.

El índice referido al cilindro sometido a presión interior permite la selección de la variable a optimizar y aquella restringida, siendo el coste y la resistencia, respectivamente. De la misma forma, el programa calcula automáticamente la ecuación a minimizar (*Figura 50*).

The screenshot shows the 'Definición de componentes' (Component Definition) window in EduPack. The window is titled 'Definición de componentes' and contains the following elements:

- Función y carga:** A diagram of a curved component being heated from below by a flame. The diagram is labeled 'Thermal stability'. It shows a red arrow labeled 'q' representing heat flow, a vertical line labeled 't' representing wall thickness, and a vertical line labeled 'd' representing deflection.
- Notas del componente:** 'Precision devices requiring minimal thermal distortion'. Below this, a legend defines the variables: 'q - heat flow', 't - wall thickness', and 'd - deflection'.
- Variables libres:** A dropdown menu set to 'none'.
- Variables fijas:** A dropdown menu set to 'heat flux, geometry'.
- Restricción limitante:** A dropdown menu set to 'deflection'.
- Optimizar:** A dropdown menu set to 'dimensional stability'.
- Índice de rendimiento:** A box labeled 'Índice de rendimiento' with 'Maximizar:' and the formula $\frac{\lambda}{\alpha}$. A blue link labeled 'símbolos' is located below the formula.
- Ajustes del eje:** A section with the following options:
 - Título del eje: 'Dimensional stability' (text input).
 - Radio buttons for 'Valores absolutos' (selected), 'Valores relativos', 'Logarítmica', 'Lineal', 'Escala automática', and 'Conjunto' (selected).
 - Two numerical input fields: '0,06345' and '247,4'.

Figura 49. Recorte de EduPack del índice de rendimiento referido a la estabilidad térmica con sus respectivos parámetros limitantes.

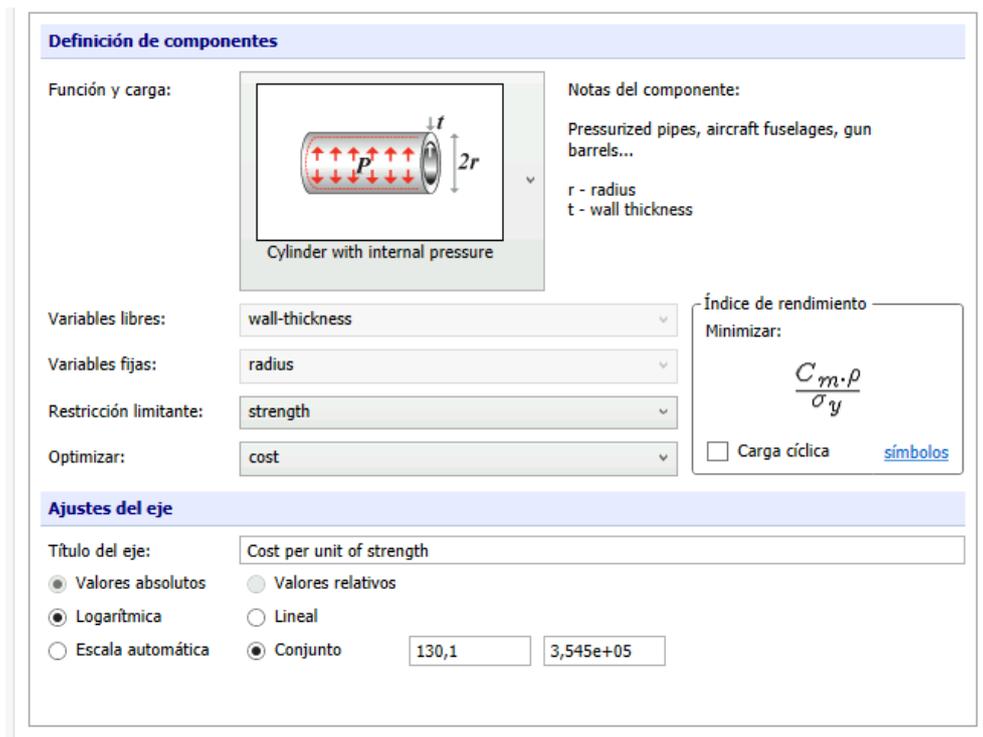


Figura 50. Recorte de EduPack del índice de rendimiento referido al coste de un cilindro sometido a presión interior restringiendo la resistencia.

APÉNDICE V: Esquemas procesos de fabricación

Los procesos de fabricación considerados en el apartado 5.5.2. vienen representados a continuación para apoyar la explicación de cada procedimiento. La *Figura 51* presenta el molde de prensado que forma el cuerpo verde, para luego introducirlo en el horno, técnica similar a la de la *Figura 53*, que combina todo en un solo paso. Por otro lado, el prensado isostático en frío expuesto en la *Figura 52* muestra el recipiente que utiliza una bomba de alta presión, que se transmite a través del fluido uniformemente en todas las direcciones, compactando los polvos dentro del molde de elastómero. El proceso de fundición deslizante descrito en la *Figura 54* ofrece una visión esquemática de la absorción de la suspensión por parte del molde poroso, la formación de una capa firme en la superficie del molde, el vertido de la mezcla restante y la posterior sinterización para el secado completo de la pieza. También, se muestra en la *Figura 55* el recipiente a presión que recoge la preforma fina de polvo característica del prensado isostático en caliente, que se combina junto con la sinterización al estar sometido a elevada temperatura.

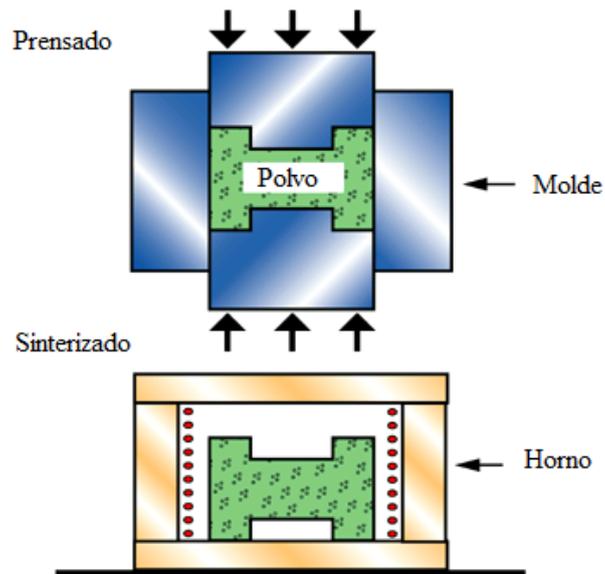


Figura 51. Ilustración esquemática sobre el proceso de prensado y sinterizado del polvo cerámico.

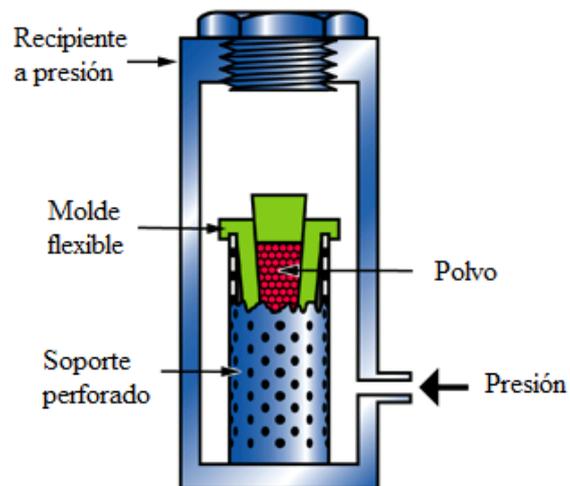


Figura 52. Ilustración esquemática sobre el proceso de prensado isostático en frío del polvo cerámico.

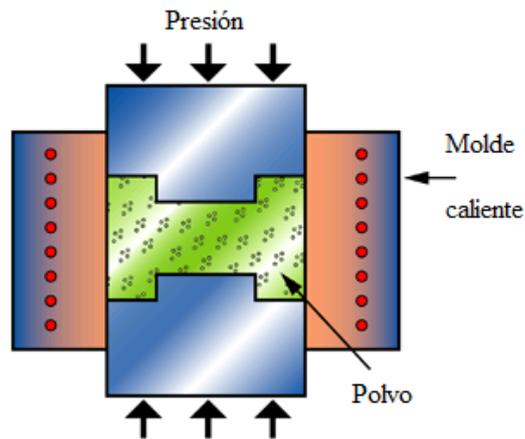


Figura 53. Ilustración esquemática sobre el proceso de prensado en caliente del polvo cerámico.

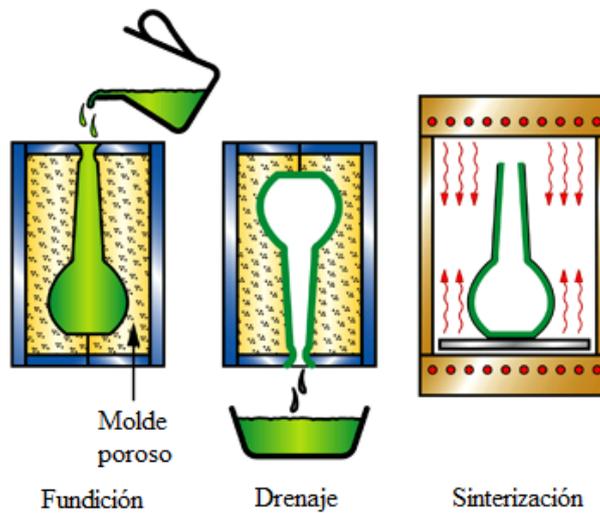


Figura 54. Ilustración esquemática sobre el proceso de fundición deslizante del polvo cerámico.

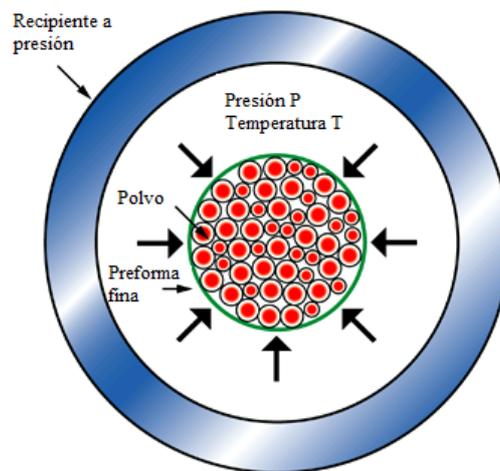


Figura 55. Ilustración esquemática sobre el proceso de prensado isostático en caliente a pequeña escala del polvo cerámico.

APÉNDICE VI: Part Cost Estimator

Esta herramienta permite estimar el coste por pieza para un determinado proceso de producción. La *Figura 56* muestra la disposición dentro de la aplicación de los parámetros explicados en la sección 5.5.3. particularmente para el Sialons mediante el proceso de conformación primario de prensado y sinterización, donde se mantendrán los mismos valores para los distintos materiales.

Part cost estimator

Cálculo del coste de la pieza: dirigido al diseño conceptual de la etapa inicial, cuando se están considerando varios materiales y aún no se han definido los detalles del diseño.

Considera:

- Material y hasta dos procesos de conformado
- Tamaño y complejidad de la pieza
- Formato estándar y personalizado
- Opciones para el reciclaje de residuos de fabricación

Detalles del componente

Material: Sialons (Si-Al-O-N ceramic)

Valor del material de desecho: 5 % del precio virgen

Masa de la pieza: 0,02 kg

Longitud de la pieza: 0,23 m

Tamaño del lote: 10 - 100 Número de valores: 9

Proceso de conformación primario

Proceso primario: Die pressing and sintering

Disponibilidad: Formato personalizado

Complejidad de la pieza: Estándar

Factor de carga: 5 %

Gastos generales: 140 EUR/hr

Tiempo de amortización del capital: 10 years

Este modelo generará 9 registros

Figura 56. Recorte de la herramienta “Part Cost Estimator” con los datos utilizados en el cálculo del impacto económico.

APÉNDICE VII: Presupuesto económico

En el presente apartado se especifican debidamente referenciados los costes asociados a la elaboración y producción de la boquilla de proyección en frío desarrollada en este estudio, incluyendo los salarios de los profesionales que participan, el material y las licencias de software necesarias para la creación del diseño. Todos los importes reflejados coinciden con el precio de venta a usuarios particulares suministrado por las empresas o fabricantes. Para determinar la viabilidad económica se han desarrollado una serie de cuadros de precios parciales para cada una de las etapas que forma el desarrollo del producto y, finalmente, el presupuesto general del proyecto.

En primer lugar, el importe relacionado a la etapa de diseño considera la licencia de estudiante del software MATLAB para la simulación numérica de los modelos presentados en este proyecto y la consecución de la geometría óptima, representada dimensionalmente a través del software Fusion 360.

Tabla 10. Presupuesto parcial de los softwares utilizados en el proyecto.

Licencia de software	Tipo	Coste total (€)
MATLAB R2023b	Licencia de estudiante	69,00
Autodesk Fusion 360	Licencia de estudiante	0,00
Microsoft Office Hogar y Estudiantes 2021	Licencia particular y de estudiante	149,00
	TOTAL	218,00

La *Tabla 11* describe la remuneración de la mano de obra que intervino en la realización del trabajo, es decir, las reuniones de planificación, seguimiento y corrección por parte de los tutores, la autora del estudio como graduada en Ingeniería Mecánica y la jornada laboral del operario encargado en la fábrica de verificar la producción de la boquilla.

Tabla 11. Presupuesto parcial del salario de los participantes en el proyecto.

Descripción	Coste unitario (€/h)	Cantidad (h)	Coste total (€)
Dos docentes responsables del proyecto	46,00	40,00	1840,00
Graduado en Ingeniería Mecánica	14,15	360,00	5094,00
Operario industrial	9,74	7,00	68,18
TOTAL			7 002,18

El coste de fabricación de la boquilla está relacionado con el material, la manufactura, la potencia energética requerida, los bienes de equipo y maquinaria que vienen agrupados en la estimación del apartado 5.5. que evalúa el mecanismo industrial completo para un lote de 100 piezas de carburo de silicio confeccionadas a través del prensado y la sinterización. De esta forma, se muestra en la *Tabla 12* el presupuesto final de que incluye las valoraciones parciales de todos los aspectos implicados en el proyecto.

Tabla 12. Resumen del presupuesto completo para el desarrollo del producto.

Descripción	Coste parcial (€)
Portátil ASUS F541U	389,00
Licencias de software	218,00
Recursos profesionales	7002,18
Proceso de fabricación y material	6000,00
TOTAL	13 609,18 €
TOTAL (SÓLO MODELO)	7541 €
TOTAL + MAQUINARIA NUEVA	2 473 609,18 €