

## Ensayo Expositivo

# La proyección en frío como alternativa para la fabricación de recubrimientos de nueva generación

Recibido: 29-06-2022 Aceptado: 25-11-2022 (Artículo Arbitrado)

### Resumen

La proyección en frío (CS) es una tecnología para la fabricación de recubrimientos que se encuentra en desarrollo, siendo una alternativa de menor consumo energético que contribuye a la reducción de gases contaminantes con respecto a las tecnologías convencionales. El menor consumo energético de CS se debe a las temperaturas de trabajo menores con respecto a las técnicas convencionales para la fabricación de recubrimientos por otras técnicas. Por otra parte, debido al uso de gases inertes durante el proceso, existe una contribución ambiental, ya que no se generan subproductos químicos producidos por reacciones a altas temperaturas. El CS tiene un gran potencial para el desarrollo de recubrimientos de nueva generación, es decir, aplicados a nuevas tecnologías, y/o nuevos conceptos de recubrimientos que solucionen problemas ya existentes dentro de la industria. La tecnología de CS presenta gran potencial para el desarrollo de diferentes componentes como implantes para la industria biomédica, componentes en dispositivos para el almacenamiento de energía, superficies conductoras en la industria electrónica, recubrimientos con propiedades físico-mecánicas que permitan la reducción de peso de autopartes en la industria automotriz.

### Abstract

Cold spray (CS) is a technology for coating fabrication that is in development; it is an alternative with lower energy consumption that contributes to reducing contaminated gas emissions compared to conventional thermal spray systems. The lower energy consumption of CS is due to the lesser working temperatures than traditional techniques used for coating fabrication. On the other hand, CS uses inert gases during the process, so it generates an environmental contribution. Additionally, sub-products are not caused due to the lower working temperatures. CS has enormous potential to develop new-generation coatings, which means coating to be used in new technologies and solve industry problems. CS technologies have a vast potential to create new components such as implants in the biomedical industry, devices for energy storage, and conducted surfaces in the electric sector, coating with physicochemical properties that allow reduction of the weight in the auto parts for the automobilist industry.

### Résumé

La projection à froid (CS) est une technologie de fabrication de revêtements en développement, étant une alternative à faible consommation d'énergie qui contribue à la réduction des gaz polluants par rapport aux technologies conventionnelles. La plus faible consommation d'énergie du CS est due aux températures de travail plus basses par rapport aux techniques conventionnelles de fabrication de revêtements par d'autres techniques. D'autre part, en raison de l'utilisation de gaz inertes au cours du processus, il existe une contribution environnementale, car les sous-produits chimiques produits par des réactions à haute température ne sont pas générés. CS a un grand potentiel pour le développement de revêtements de nouvelle génération, c'est-à-dire appliqués à de nouvelles technologies et/ou de nouveaux concepts de revêtement qui résolvent les problèmes existants dans l'industrie. La technologie CS présente un grand potentiel pour le développement de différents composants tels que les implants pour l'industrie biomédicale, les composants dans les dispositifs de stockage d'énergie, les surfaces conductrices dans l'industrie électronique, les revêtements aux propriétés physico-mécaniques qui permettent la réduction de poids des pièces automobiles dans l'automobile industrie.

John Dairo Henao Penenrey<sup>1</sup>  
Paola Andrea Forero Sossa<sup>\*1,2</sup>  
Astrid Lorena Giraldo Betancur<sup>2</sup>  
Carlos Poblano Salas<sup>1</sup>  
Jorge Corona Castuera<sup>1</sup>

**Palabras clave:** Recubrimientos, proyección en frío, nuevas aplicaciones, mecanismos.

**Keywords:** Coatings, cold spray, new applications, mechanism.

**Mots-clés:** Revêtements, projection à froid, nouvelles applications, mécanismes.

<sup>1</sup>CONACyT – CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada

<sup>2</sup>CONACyT – Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN  
Unidad Querétaro

\*Correspondencia:  
paoforeroso@gmail.com

## Introducción

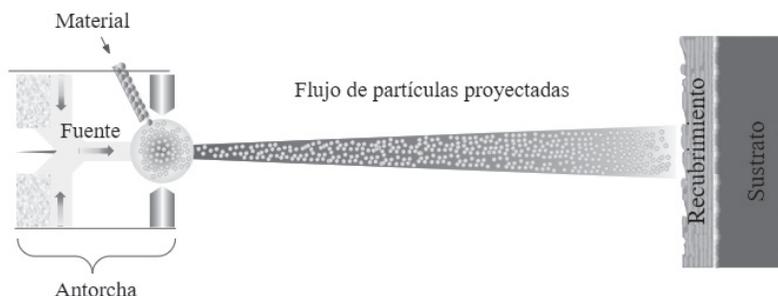
Aunque a menudo pasan desapercibidos, los recubrimientos hacen parte de productos comerciales y son diseñados para proteger, extender la vida útil y/o proporcionar propiedades únicas a un producto determinado. Los recubrimientos permiten que nuestros autos y casas se puedan preservar por un tiempo prolongado. Un recubrimiento se define como aquella capa de material que se deposita sobre la superficie de un producto o componente con el fin de proporcionar protección física o química, mejorar las propiedades mecánicas, proveer de propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas o biológicas mejoradas con respecto a las propiedades del material base y/o para cumplir un propósito decorativo y/o para la reparación dimensional. En este sentido, un recubrimiento puede ser una pintura, cemento, una capa de óxido generada a propósito sobre la superficie de un metal, y/o cualquier material que permita ser procesado para permanecer adherido sobre la superficie de otro material mientras cumple alguna función específica (Stoye & Freitag, 1998). Por ejemplo, la función de las pinturas que usan nuestros automóviles no solo es estética, sino también funcional, ya que protege el metal base de la carrocería frente a la oxidación y el ambiente extremo, ya que este tipo de pinturas debe soportar inclemencias del ambiente.

Existen diferentes tipos de recubrimientos, los cuales se pueden dividir en dos grandes familias: los recubrimientos de capa delgada y los recubrimientos de capa gruesa. Los recubrimientos de capa delgada son aquellos con espesores del orden sub-micrométrico y nanométrico; mientras que los recubrimientos de capa gruesa son aquellos con espesores del orden micrométrico y milimétrico. Por mencionar algunos ejemplos de recubrimientos de capa delgada, encontramos aquellos utilizados en la industria aeroespacial y de la aviación en superficies de vidrio,

tales como en las ventanas de las aeronaves para modificar las propiedades ópticas del vidrio (Abegunde et al., 2019). Por su parte, los recubrimientos de capa gruesa los podemos encontrar en superficies de implantes médicos para mejorar la integración del implante dentro del cuerpo humano. En la industria del petróleo o química los podemos encontrar en la superficie de las estructuras con el propósito de protegerlas frente a ambientes corrosivos. De esta forma, se podrían mencionar infinidad de aplicaciones de los recubrimientos en productos comerciales e industriales dentro de diferentes campos (John Henao et al., 2020).

Aunque existen múltiples procesos para la fabricación de recubrimientos de capa gruesa, en los últimos 40 años se ha destacado el uso de procesos de proyección térmica para la obtención de recubrimientos para diferentes aplicaciones industriales y tecnológicas. Los procesos de proyección térmica, tal como se esquematiza en la Figura 1, consisten en un sistema que suministra energía, ya sea química, eléctrica o cinética, que se emplea como fuente para elevar la temperatura y acelerar el material que se desea obtener como recubrimiento sobre la superficie de la pieza o componente seleccionado. Este material se inyecta haciéndose pasar a través de la fuente de energía térmica y con ayuda del diseño interior de la antorcha de proyección térmica, se produce la aceleración del material, el cual se desplaza a una velocidad que puede ir desde 200 m/s hasta 1400 m/s para luego alcanzar la superficie del sustrato, en donde por fenómenos de transferencia de calor, se enfría y mantiene adherido sobre la superficie formando un recubrimiento homogéneo (Łatka et al., 2020).

Los orígenes de la proyección térmica datan de principios del siglo XX, cuando el Dr. M.U. Schoop en 1911 presentó el proceso más básico dentro de la familia de proyección térmica, conocido hoy en día



**Figura 1.** Esquema de los procesos de proyección térmica.

como proyección térmica por llama o por combustión oxiacetilénica. Otros procesos fueron desarrollados a mediados del siglo XX, entre ellos la proyección térmica por llama con alimentación por alambre, la antorcha de detonación y la proyección térmica por combustión de alta velocidad, conocida como HVOF por sus siglas en inglés (todas en la década de los 50's). La proyección térmica por plasma fue desarrollada en 1958 como una variante a la proyección térmica por combustión; en este sistema, se genera un plasma por la acción de un arco eléctrico. Esta alternativa permitió la fabricación no solo de recubrimientos metálicos, sino también de recubrimientos cerámicos y de materiales de alto punto de fusión. En la última mitad del siglo XX se generaron alternativas a los procesos antes mencionados dada la necesidad de obtener recubrimientos con propiedades mejoradas para aplicaciones en nuevas tecnologías. Un requerimiento importante, fue la necesidad de generar recubrimientos compactos, con baja oxidación y alta adherencia. En este sentido, se introdujeron variantes con atmósferas controladas e inyección de material en estado líquido, como la proyección térmica por plasma en vacío o la proyección térmica por combustión en suspensión, entre otras. Hacia finales del siglo XX e inicios del siglo XXI, empezó el auge de un proceso alternativo conocido como proyección en frío (CS por sus siglas en inglés) (Siegmann & Abert, 2013).

Debido a la variedad de procesos de proyección térmica, la utilidad de estos recubrimientos ha sido amplia dentro de diferentes industrias, como son, petrolera, energética, aeroespacial, manufacturera. Solucionando problemas de corrosión, difusión térmica, desgaste. Adicionalmente, tienen un gran potencial para ser usados en otro tipo de industrias como la biomédica (Vardelle et al., 2016).

## Desarrollo Recubrimientos de nueva generación

A medida que la tecnología avanza, surgen nuevos retos tecnológicos que requieren nuevas soluciones y alternativas, algunos de estos probablemente pudieran ser atendidos a través de recubrimientos de nueva generación (Aghasibeig et al., 2019). Dentro de estos llamados recubrimientos de nueva generación, se encuentran recubrimientos auto-reparables, para ambientes extremos. También se pueden encontrar recubrimientos que permiten disminuir la huella eco-

lógica, como son los usados para los tratamientos de aguas. Adicionalmente, se encuentra el desarrollo de implantes con propiedades multifuncionales. En el caso de la industria electrónica se encuentran recubrimientos con propiedades ópticas específicas. De esta misma manera se pueden encontrar recubrimientos de nueva generación en múltiples industrias y sectores tecnológicos.

En este sentido, se ha visto un crecimiento de la industria de la proyección térmica (Markets, 2021). Específicamente, el crecimiento esperado en este periodo se centra en la industria aeroespacial, automotriz, biomédica y otras dedicadas al desarrollo de nuevas tecnologías. La industria aeroespacial en México aporta el 3.5 % del PIB (Aviation & the environment, 2019). Por tal razón, los diferentes retos científicos y tecnológicos que enfrenta esta industria como la búsqueda de mayores eficiencias en los sistemas de propulsión, la ampliación del rango de operación de los componentes de los motores y la disminución en problemáticas asociadas al desgaste, corrosión, fatiga térmica, etc. Al igual que la industria aeroespacial, la automotriz representa uno de los mercados más sólidos en México, representando cerca del 3.5 % del PIB (AMIA, 2015). Los recubrimientos más usados en la industria automotriz están enfocados en proteger las autopartes con recubrimientos de materiales metálicos y cerámicos, con el propósito de evitar la corrosión, erosión y/o actuar como barrera térmica en componentes sometidos a alta temperatura en algunas zonas de los motores a combustión (Fauchais, Heberlein, & Boulos, 2014).

Para el caso de la industria biomédica, el mercado se encuentra representado principalmente por importaciones de países como USA, Alemania e Italia (ANAPS). En este mercado, México es el principal importador de dispositivos médicos en Latinoamérica. Actualmente, múltiples esfuerzos desde la industria privada y de sectores públicos se están enfocando en desarrollar dispositivos médicos para el consumo interno del país (Ibarra et al., 2013). Para el funcionamiento de muchos dispositivos médicos es conveniente el uso de recubrimientos de materiales que mejoren la respuesta bioactiva del material base, que usualmente es un acero, aleaciones de titanio y cobalto-cromo. Este recubrimiento por lo general es de hidroxiapatita (mineral similar al que se encuentra naturalmente en el tejido óseo), cuyas características

están reguladas por la norma ISO 13779-2:2008. Adicionalmente, el único proceso avalado por la FDA hasta el momento para la fabricación de dicho recubrimiento es la proyección por plasma. Recientemente, se ha demostrado que existen otros biomateriales que presentan respuesta biocompatible mucho más alta en comparación con la hidroxiapatita; no obstante, el proceso de obtener recubrimientos de estos materiales aún se encuentra en desarrollo, siendo la proyección térmica una alternativa atractiva para la producción de estos recubrimientos (Jones, 2013).

### Proyección en frío

La proyección en frío es una técnica de proyección cinética de reciente desarrollo (1980) por el Dr. Anatolli Papyrin y sus colaboradores en el Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada de la Academia Rusa de Ciencias (ITAM-RAS), en donde se observó que, las partículas que eran aceleradas hasta velocidades supersónicas, en vez de erosionar la superficie del sustrato presentaban una rápida acumulación, de tal forma que permitían el depósito de un recubrimiento. A continuación, se explica brevemente en qué consiste la proyección en frío. Inicialmente, un suministro de gas a alta presión, puede ser aire, nitrógeno, helio o una mezcla de estos, se comprime a una presión entre 3 bar y 55 bar (0.3 MPa y 5.5 MPa) y se calienta a temperaturas entre 100 y 1100 °C; seguidamente, el gas o la mezcla de gases pasa por una pistola de proyección en frío. Típicamente, estas pistolas consisten

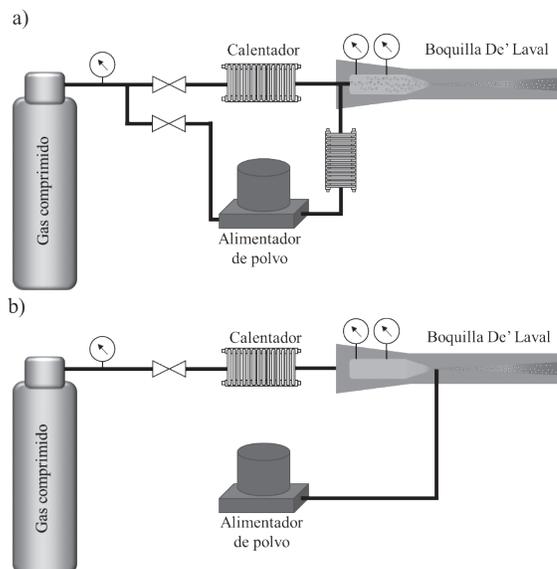
en una boquilla convergente/divergente conocidas también como tipo De' Laval, las cuales permiten que el gas y las partículas alcancen velocidades supersónicas entre 300 y 1500 m/s, de tal manera que colisionan con el sustrato para formar el recubrimiento. En la Figura 2 se presenta un esquema del funcionamiento de los sistemas de proyección en frío (Botef & Villafuerte, 2015; John Henao et al., 2020).

En la proyección en frío las partículas se depositan en estado sólido; puesto que, tanto el tiempo de residencia de las partículas en el jet como la temperatura de este último no promueven la fundición de los materiales proyectados. Aunque el proceso de proyección en frío es simple, controlarlo representa un reto debido a la cantidad de parámetros a considerar durante la operación (John Henao et al., 2020).

Los sistemas de proyección en frío se clasifican en dos categorías principales, según el rango de presión de funcionamiento y la ubicación de inyección de los polvos en la boquilla: proyección en frío de alta presión (HPCS por sus siglas en inglés) y proyección en frío de baja presión (LPCS por sus siglas en inglés), ambas se presentan en la Figura 2.

La proyección en frío de alta presión opera a presiones máximas de gas entre 50 y 55 bar (5.0-5.5 MPa), mientras que la temperatura de trabajo del gas está en el rango de 20 a 1100 °C y las velocidades de partícula a menudo se encuentran en el régimen supersónico. Para estos sistemas, las partículas se inyectan axialmente en la corriente de gas en una precámara. Luego, tanto el gas a alta presión como las partículas pasan a través de la parte convergente de la boquilla tipo De' Laval en donde se comprime el gas, tal como se muestra en la Figura 2a. La aceleración de las partículas ocurre cuando estas pasan a través de la parte divergente de la boquilla, donde se expande el gas.

La proyección en frío de baja presión opera a presiones máximas de 10 bar (1 MPa); en cuanto a las temperaturas de trabajo del gas, están en el rango de 20 a 650 °C; además, las partículas se inyectan radialmente a la corriente del gas en la parte divergente de la boquilla, como se presenta en la Figura 2b. En los sistemas de proyección en frío de baja presión, las velocidades de partícula son inferiores a las obtenidas en los sistemas de alta presión, estando habitualmente por debajo de 600 m/s. Es importante resaltar que un equipo de proyección en frío de baja presión es de bajo costo y de funcionamiento rentable, puesto que emplea aire



**Figura 2.** Esquema básico del funcionamiento de los equipos de proyección en frío a) de alta presión (HPCS) b) de baja presión (LPCS). Fuente: Modificado de John Henao et al., 2020; Vardelle et al., 2016.

**Tabla 1.** Comparación entre los sistemas de proyección en frío de alta y de baja presión (John Henao et al., 2020).

Parámetro	HPCS	LPCS
Gas de proceso	N <sub>2</sub> , He, Mezcla	Aire comprimido
Presión (bar)	7 – 55	6 – 10
Temperatura (°C)	Ambiente – 1100	Ambiente – 650
Tasa de alimentación (kg/h)	4.5 – 13.5	0.3 – 3
Distancia de rociado (mm)	10 – 50	5 – 15
Tamaño de partícula (μm)	5 – 50	5 – 30

comprimido como gas propulsor es portátil y fácil de manipular (John Henao et al., 2020). En la Tabla 1 se presenta una comparativa de las diferentes características entre los dos sistemas de proyección en frío.

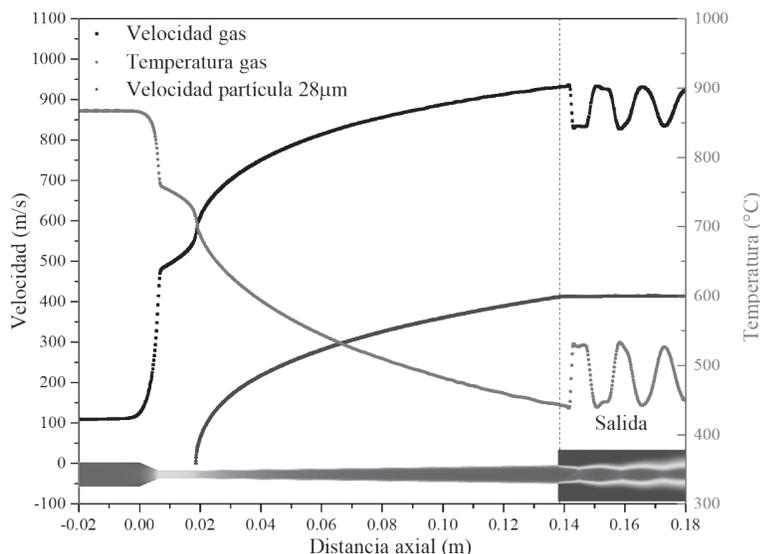
Una de las partes fundamentales del sistema de proyección en frío son las boquillas tipo De' Laval, las cuales presentan un área de sección transversal que es variable a través de la longitud de la boquilla, lo que promueve la compresión y expansión de la corriente de gas (King, Yandouzi, & Jodoin, 2015).

Partiendo de la teoría de los flujos compresibles y con varias suposiciones, Dykhuizen y Smith plantean un modelo 1D para explicar el comportamiento tanto del gas como de las partículas al interior de la boquilla (Dykhuizen & Smith, 1998). Encontraron que las variables de estado del gas en el interior de la boquilla son dependientes de la geometría y de las capacidades caloríficas del gas. Particularmente, los gases con menor peso molecular como el N<sub>2</sub> y He permiten alcanzar velocidades de gas más altas en comparación de las alcanzadas con el aire, puesto que la re-

lación de sus capacidades caloríficas se hace mayor aportando mayor energía en incrementar su velocidad en lugar de aumentar su temperatura.

Con base en los resultados de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), en la Figura 3 se presenta el comportamiento del gas y de una partícula a través de una boquilla tipo De' Laval. En la Figura 3 se observa que la velocidad empieza en un valor mínimo que posteriormente, incrementa a regímenes supersónicos al pasar a través de la boquilla. En contraste, la temperatura del gas empieza con un valor máximo y al pasar a través de la boquilla, la temperatura disminuye. Adicionalmente, se observa una fluctuación en la velocidad y temperatura del gas a la salida de la boquilla, asociada con la formación de ondas de choque debido a la diferencia de presiones entre el interior de la boquilla y el exterior de esta. En cuanto al comportamiento de las partículas, en la Figura 3 se presenta la velocidad para una partícula de hidroxiapatita de 28 μm de diámetro inyectada después de la garganta, en donde se observa que presenta un comportamiento similar al del gas. No obstante, la velocidad de partícula es menor en comparación con la velocidad del gas, además no se afecta significativamente por las fluctuaciones del gas.

Para partículas de tamaños menores a 10 μm, estas se aceleran fácilmente y adquieren velocidades cercanas a la velocidad del gas, pero son altamente afectadas por las ondas de choque y la interacción del jet con el sustrato. Por su parte, las partículas de mayor tamaño son más difíciles de acelerar alcanzando velo-



**Figura 3.** Curvas de velocidad y temperatura, así como el diagrama de contorno y velocidad de partícula para una partícula inyectada en una boquilla de LPCS comercial obtenidos por CFD.

**Fuente:** Elaboración propia.

tidades menores que la velocidad del gas; no obstante, estas partículas son poco afectadas por las ondas de choque y por la interacción con el sustrato.

Una de las mayores interacciones que tiene el jet con el sustrato es conocido como “bow shock”, que es una onda de choque que se forma cuando un jet a velocidades supersónicas impacta sobre una superficie, como es el caso del sustrato. El “bow shock” modifica el flujo del gas sobre la superficie dando lugar a que, tanto el gas como las partículas arrastradas por este, se desvíen. Una forma de reducir el efecto del “bow shock” es incrementando la distancia de rociado (Grujicic et al., 2004).

### Tipos de materiales

En ciencia de materiales, los materiales usualmente se clasifican en grupos en función de su comportamiento estructural y sus diferentes propiedades; en ese sentido, podemos encontrar los metales, cerámicos, polímeros, entre otros.

Inicialmente, los metales presentan una estructura atómica bien definida, además, presentan un enlace metálico, los metales tienen excelente conductividad eléctrica y térmica, excelentes propiedades mecánicas como rigidez, ductilidad, resistencia al impacto. Estas características hacen de este tipo de materiales especialmente útiles.

Los materiales cerámicos, en ciencia de materiales, pueden definirse como sólidos inorgánicos; sin embargo, existen materiales que, aunque no entran en esta definición comparten muchas propiedades de los cerámicos como los carburos metálicos. Por lo general, los cerámicos presentan una estructura atómica bien definida; sin embargo, también pueden encontrarse de forma vítrea, es decir, amorfos o desordenados atómicamente. Las características propias de los cerámicos: baja conductividad térmica y eléctrica, lo que es útil para su uso como aislantes. En

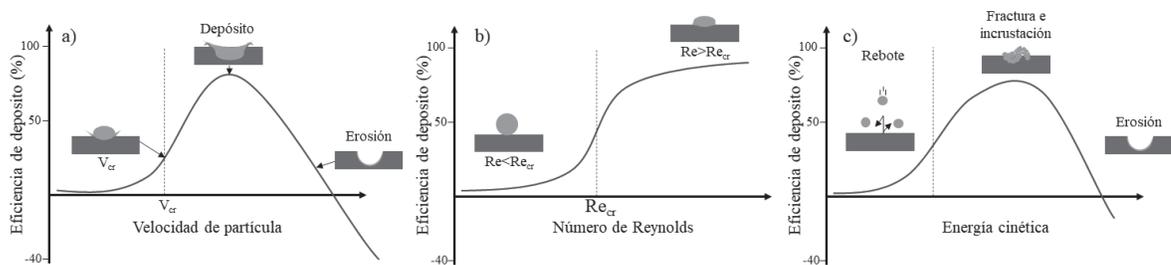
cuanto a las propiedades mecánicas, los cerámicos son duros, aunque frágiles, es decir, son poco deformables y se fracturan fácilmente.

En cuanto a los polímeros, estos son macromoléculas formadas por la unión repetida de una o varias moléculas, los polímeros presentan por lo general, una estructura atómica desordenada. Los polímeros presentan baja conductividad eléctrica y térmica, así como menor resistencia mecánica. En lo que se refiere al comportamiento térmico, existen polímeros termoplásticos, que presentan buena ductilidad. Por otro lado, existen los polímeros termoestables, los cuales son más resistentes, aunque más frágiles (Askeland, 1998; Fauchais et al., 2014).

### Mecanismos de obtención de los recubrimientos y ventanas de depósito

Como ya se ha mencionado, en la proyección en frío las partículas llegan en estado sólido, por lo que los mecanismos de depósito están asociados con deformaciones elásticas, plásticas e incluso, fractura de los materiales involucrados durante el proceso de depósito. Teniendo en cuenta las altas velocidades de impacto con la que llegan las partículas al sustrato los mecanismos de depósito son altamente dependientes de las características de los materiales usados.

En la Figura 4, se presentan algunos de los mecanismos de depósito reportados en la literatura. Cuando la interacción es metal-metal, es decir tanto las partículas a depositar como el sustrato son metales, el comportamiento de las partículas durante el depósito se puede determinar mediante su velocidad. Para esto, existe una velocidad a partir de la cual las partículas interactúan con el sustrato de tal forma que generan un fuerte enlace que da lugar a la formación del recubrimiento; este valor es conocido como velocidad crítica ( $v_{cr}$ ), la Figura 4a se esquematiza el comportamiento anteriormente dicho. Si la velocidad de impacto de las



**Figura 4.** Mecanismos de depósito por proyección en frío en función de los tipos de materiales a) interacción metal-metal, b) interacción metal amorfo-metal y c) interacción cerámico-metal. **Fuente:** Elaboración propia.

partículas es menor que la  $v_{cr}$ , no se formará recubrimiento; por otro lado, si la velocidad de impacto de las partículas es mucho mayor que  $v_{cr}$ , esto provocará la erosión de la superficie del sustrato. De acuerdo con lo anterior, velocidades de partícula cercanas a  $v_{cr}$ , serán aquellas que darán lugar a un recubrimiento exitoso. A estas velocidades se promueve el incremento de temperatura en la intercara partícula-sustrato, dando lugar a un fuerte enlace partícula-sustrato (Schmidt, Gärtner, Assadi, & Kreye, 2006).

En cuanto a los recubrimientos de vidrios metálicos sobre metales, se pueden considerar como líquidos subenfriados, por lo que las propiedades de los fluidos pueden ser aplicadas en estos materiales, tomando las partículas de vidrio metálico como gotas; teniendo esto en consideración, se determinó que la eficiencia de depósito está altamente relacionada con el número de Reynolds. Con base en esto, es posible determinar una ventana de depósito para vidrios metálicos en función del número de Reynolds, tal y como se muestra en la Figura 4b. Si el número de Reynolds es menor que  $Re_{cr}$ , las partículas no presentarán un comportamiento plástico y tenderán a fracturarse, dando lugar a un recubrimiento poroso y pobremente adherido al sustrato. Por otro lado, si el número de Reynolds es mayor que  $Re_{cr}$ , las partículas se deforman plásticamente, permitiendo obtener un recubrimiento denso con una fuerte adherencia con el sustrato, permitiendo obtener eficiencias de depósito cercanas al 100 % (J. Henao et al., 2017). En comportamiento de los polímeros es muy similar al de los vidrios metálicos en el régimen viscoelástico.

En cuanto a los recubrimientos de materiales cerámicos sobre sustratos metálicos, múltiples propuestas de mecanismos de depósito se encuentran en la literatura; sin embargo, no existe un consenso en lo que corresponde a un modelo que describa este fenómeno. No obstante, el depósito parece estar regido por un proceso inicial de activación del sustrato debido al impacto de las partículas, seguido por la fractura y posterior fragmentación del cerámico. Estos procesos dan lugar a que las partículas cerámicas queden incrustadas en el sustrato propiciando un anclaje mecánico con este (Cinca et al., 2016). Aunque aún no existe un modelo que permita predecir una ventana de depósito para los materiales cerámicos, parece ser que la energía cinética podría englobar varias de las características que participan en la formación del recubrimiento.

Con base en lo anterior, en este trabajo se da la primera propuesta acerca de evaluar la eficiencia de depósito de los cerámicos en función de la energía cinética y demás parámetros involucrados en el proceso como el tamaño de partícula y densidad. De acuerdo con esto, se presenta la Figura 4c, en la cual se propone que pudiese existir un valor mínimo de energía cinética, por debajo del cual las partículas tenderían a rebotar o desviarse. Finalmente, si la energía cinética de las partículas es mucho mayor, se promoverían fenómenos de erosión en la superficie del sustrato y del recubrimiento. No obstante, el depósito de partículas cerámicas por la técnica de proyección en frío es un tema de desarrollo científico actualmente.

### La proyección en frío y su rol en el desarrollo de nueva tecnología

Actualmente, nuestra sociedad se enfrenta a nuevas regulaciones ambientales como consecuencia del cambio climático promovido por la actividad humana. En lo que respecta a la formación de recubrimientos la proyección en frío es una excelente alternativa a los procesos convencionales de proyección térmica se puede decir que el proceso de proyección en frío es amigable con el medio ambiente, lo que encaja con la transformación requerida por las industrias actuales en el camino al desarrollo de industrias sustentables.

En el caso de la industria automotriz, la proyección en frío parece ser una alternativa interesante para la protección de los materiales estructurales base en comparación con las tecnologías tradicionales de (pinturas y electroplating). Lo métodos tradicionales presentan grandes inconvenientes a solucionar como la conservación de los recursos es baja, aumento del consumo energético, generación de productos volátiles, almacenamiento de los precursor (Duarte et al., 2020).

Por otra parte, la industria aeroespacial esta realizando intentos que permiten la reparación de componentes; sin embargo, el reto se centra en aplicar proceso de reparación a varios componentes con la menor cantidad de tecnologías involucrados, manteniendo la resistencia mecánica y/o funcionalidad de los componentes reparados en este sentido la proyección en frío está siendo empleada para tal fin (Meraz-Rodríguez, Ayvar-Campos, & Papadopoulos, 2020).

En la industria electrónica y de energía, recubrimientos por proyección en frío permitirían el uso de sensores metálicos y cerámicos por el grado de pureza y requerimientos dimensionales que hoy en día son controlados por técnicas tradicionales que involucran una gran cantidad de pasos para su elaboración, reduciendo costos.

La proyección en frío es una tecnología clave para la generación de nuevos dispositivos y componentes. En el caso de materiales metálicos, la proyección en frío ha demostrado que dentro de su alcance se encuentra la generación de capas de recubrimiento densas y bien adheridas sobre diferentes superficies sin la presencia de óxidos al final del proceso.

Se espera que para el año 2030, la proyección en frío se consolide como alternativa para la generación de nuevos materiales y recubrimientos y, por lo tanto, permitan un incremento en el mercado de la proyección en frío alcanzando, especialmente asociado con aplicaciones en las industrias aeroespacial, electrónica, automotriz y de la salud (GlobalNewsWire, 2017).

Los retos de la proyección en frío en los años venideros, hablando particularmente en función de los materiales que pueden ser depositados, se centra en el caso de los metales en la optimización de los procesos y evaluación de las ventajas de los recubrimientos obtenidos sobre procesos convencionales de fabricación (Poblano-Salas et al., 2021).

Por otra parte, en el caso de la aplicación de materiales cerámicos por proyección en frío, el reto es aún mayor, ya que como se mencionó previamente, los mecanismos que actúan en la formación y obtención de recubrimientos cerámicos siguen en estudio actualmente. La clave para el desarrollo de recubrimientos de materiales cerámicos se logrará con el entendimiento de las diferentes variables que actúan en la formación de los recubrimientos y en los esfuerzos en la predicción y/o generación de correlaciones que faciliten la selección de parámetros de procesamiento que deriven en recubrimientos homogéneos y con propiedades mecánicas que permitan su aplicación en diferentes tecnologías. En este sentido, se conoce que actualmente se realizan esfuerzos a nivel mundial en el entendimiento de los materiales cerámicos depositados por proyección en frío, en México el Laboratorio Nacional de Proyección Térmica (CENAPROT), el cual involucra las instituciones- CIATEQ – CINVESTAV-CIDESI con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y

Tecnología (CONACYT). Además, grupos de investigación en Francia, España y Alemania también están desarrollando modelos que permiten comprender el comportamiento de los cerámicos a través de la proyección en frío.

En México, las investigaciones se centran en la búsqueda de modelos empíricos y/o físicos matemáticos que permitan seleccionar y predecir condiciones de procesamiento que faciliten la fabricación de recubrimientos a nivel industrial, tal como ocurre con los modelos conocidos para los metales. Resultados parciales de la investigación realizada por los científicos en México, ha arrojado como producto el diseño y fabricación de boquillas particulares para los materiales cerámicos por proyección en frío de baja presión, que permiten una mejora en las condiciones de proceso para la formación de los recubrimientos con respecto a la configuración de boquillas comerciales de los sistemas tradicionales. Por otro lado, en Francia, la investigación revelada hasta la fecha se centra en la comprensión de fenómenos de fractura y de la estructura de los recubrimientos, buscando mejorar el entendimiento de la fenomenología del impacto de las partículas cerámicas bajo diferentes condiciones, en particular, con polvo de material cerámico aglomerado.

En el caso de los materiales poliméricos, el panorama es similar al caso de los cerámicos por proyección en frío. En México, también se han desarrollado algunas alternativas por parte del CENAPROT (CIATEQ - CINVESTAV – CIDESI) para la fabricación de este tipo de recubrimientos mediante el diseño de boquillas exclusivas para materiales poliméricos. Además, actualmente se trabaja en la comprensión de los fenómenos de transferencia de energía que experimentan estos materiales durante el proceso, con la finalidad de generar teorías que permitan una mejor toma de decisiones durante la selección de parámetros de procesamiento para la obtención de recubrimientos poliméricos por proyección en frío. Los recubrimientos poliméricos por proyección en frío podrían ser de gran interés en la industria nacional como alternativa a algunos tipos de pinturas en el sector automotriz por las ventajas ya mencionadas en este documento sobre las técnicas convencionales empleadas para la fabricación de recubrimientos. Además, podría abrirse la ventana para el desarrollo de recubrimientos compuestos con propiedades multifuncionales que permi-

tieran un mejor rendimiento funcional de tecnologías ya existentes, tal como superficies antiadherentes, superhidrofóbicas, antiestáticas, antibacterianas, biocompatibles, autorreparables, entre otros.

## Conclusiones

Los recubrimientos por proyección térmica son una alternativa para la solución de problemáticas industriales relacionadas con desgaste, corrosión, aislamiento térmico, entre otros. Aun cuando los recubrimientos por proyección térmica se conocen hace varias décadas, en particular, la proyección en frío ha llamado la atención de la industria para atender la reparación y protección de piezas y componentes. Recientemente, ha aumentado el interés en la compresión de los fenómenos involucrados en la formación de diferentes tipos de recubrimientos, no solo aquellos formados a partir de materiales metálicos, sino también de cerámicos y polímeros, ya que esto permitiría la obtención de recubrimientos de nueva generación aplicables a industrias como la electrónica, automotriz, energía, aeroespacial, etc.

En esta revisión, se ha presentado los principales conceptos relacionados con los recubrimientos de capa gruesa por proyección en frío de alta y de baja presión, la tendencia actual en el uso de la proyección en frío, y el interés de la industria por su uso como tecnología amigable con el medio ambiente. Se destaca que, aunque existe un camino recorrido en término de recubrimientos metálicos, en la actualidad existen esfuerzos desde diferentes partes del mundo orientados a obtener una mejor comprensión de los procesos de proyección en frío. En particular, con materiales cerámicos, puesto que se percibe como una oportunidad que puede detonar en la proliferación de la proyección en frío en el desarrollo de nuevos componentes y/o en el reemplazo de técnicas convencionales de alto consumo energético y contaminantes. La tendencia en los próximos años está orientada hacia el aumento del uso de la tecnología de proyección en frío, pero dependerá mucho su consolidación en los resultados de las investigaciones actuales para lograr la capacidad de encontrar aplicaciones concretas y propiedades equiparables y superiores a las alternativas convencionales que existen hoy en día para la fabricación de recubrimientos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo a través del Fondo Ciencia de Frontera, Convocatoria Paradigmas y Controversias, proyecto FOP16-2021-01 con número 320126. Así mismo, lo autores agradecen especialmente al Laboratorio Nacional de Proyección Térmica – CENAPROT por el apoyo en la realización de esta revisión. También, agradecen al programa “Investigadores por México” antes “cátedras” CONACYT por el apoyo a los proyectos 848 y 881.

## Bibliografía

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, (6), 174–199.
- Aghasibeig, M., Tarasi, F., Lima, R. S., Dolatabadi, A., & Moreau, C. (2019). A Review on Suspension Thermal Spray Patented Technology Evolution. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(7), 1579–1605.
- AMIA. (2015). Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. Consultado el 24 de noviembre de 2022, de <https://www.amia.com.mx/>
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ciudad de México: International Thomson Editores.
- Aviation, & the environment. (2019). IATA, Consultado el 26 de noviembre de 2022, de <https://www.lata.org/>
- Botef, I., & Villafuerte, J. (2015). Overview. In *Modern Cold Spray*, (pp. 1–29).
- Cinca, N., Vilardell, A. M., Dosta, S., Concustell, A., Garcia Cano, I., Guilemany, J. M., ... Peiró, F. (2016). A New Alternative for Obtaining Nanocrystalline Bioactive Coatings: Study of Hydroxyapatite Deposition Mechanisms by Cold Gas Spraying. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(4), 1420–1428.
- Duarte, J. M., Sales, N. G. S., Sousa, M. H., Bridge, C., Maric, M., & Gomes, J. de A. (2020, November 1). Automotive paint analysis: How far has science advanced in the last ten years? *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 132.
- Dykhuizen, R. C., & Smith, M. F. (1998). Gas Dynamic Principles of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 7(2), 205–212.
- Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., & Boulos, M. I. (2014). *Thermal Spray Fundamentals*. Springer Science+Business Media, 452.
- GlobelNewsWire. (2017). Send Press Releases with GlobeNewswire. Consultado el 26 de noviembre de 2022, de <https://www.globenewswire.com/>
- Grujicic, M., Zhao, C. L., Tong, C., DeRosset, W. S., & Helfrich, D. (2004). Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Science and Engineering A*, 368(1–2), 222–230.
- Henao, J., Concustell, A., Dosta, S., Bolelli, G., Cano, I. G., Lusvarghi, L., & Guilemany, J. M. (2017). Deposition mechanisms of metallic glass particles by Cold Gas Spraying. *Acta Materialia*, 125, 327–339.

- Henao, John, Poblano-Salas, C. A., Vargas, F., Giraldo-Betancur, A. L., Corona-Castuera, J., & Sotelo-Mazón, O. (2020). *Principles and Applications of Thermal Spray Coatings*.
- Ibarra, L. G., López, M., Ruiz-Palacios, G., Del Valle Cabrera, M. G., Enriquez Sandoval, M., Madinaveitia Villanueva, J. A., ... Verdejo Silva, M. (2013). *Las enfermedades y traumatismos del sistema músculo esquelético. un análisis del Instituto Nacional de Rehabilitación de México, como base para su clasificación y prevención*. México D.F.: Secretaria de Salud.
- Jones, J. R. (2013). Review of bioactive glass: From Hench to hybrids. *Acta Biomaterialia*, 9(1), 4457–4486.
- King, P., Yandouzi, M., & Jodoin, B. (2015). The Physics of Cold Spray. In *Modern Cold Spray* (pp. 31–72).
- Łatka, L., Pawłowski, L., Winnicki, M., Sokołowski, P., Małachowska, A., & Kozerski, S. (2020). Review of functionally graded thermal sprayed coatings. *Applied Sciences* (Switzerland), 10(15).
- Markets. (2021). MarketsandMarkets - Revenue Impact & Advisory Company | Market Research Reports Business Research Insights. Consultado el 24 de noviembre de 2022, de <https://www.marketsandmarkets.com/>
- Meraz-Rodríguez, J. A., Ayvar-Campos, F. J., & Papadopoulos, A. (2020). La competitividad del sector aeronáutico en México: Incidencia de la I+D y alta tecnología. *Repositorio De La Red Internacional De Investigadores En Competitividad*, 12, 835-853.
- Poblano-Salas, C. A., Sotelo-Mazón, O., Henao, J., Corona-Castuera, J., Martinez, G., Casales-Diaz, M., ... Kesarla, M. K. (2021, October 1). Flame Sprayed LaNi5-Based Mischmetal Alloy: Building-up Negative Electrodes for Potential Application in Ni-Based Batteries. *Journal of Thermal Spray Technology*, (30), 1940–1956.
- Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*, 54(3), 729–742.
- Siegmann, S., & Abert, C. (2013). 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop. *Surface and Coatings Technology*, 220, 3–13.
- Stoye, D., & Freitag, W. (1998). *Paints, Coatings and Solvents*. In D. Stoye & W. Freitag (Eds.), *Paints, Coatings and Solvents: Second Completely Revised Edition*.
- Vardelle, A., Moreau, C., Akedo, J., Ashrafizadeh, H., Berndt, C. C., Berghaus, J. O., Vuoristo, P. (2016). The 2016 Thermal Spray Roadmap. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(8), 1376–1440.