

Estudio de la Capacidad Protectora de los Recubrimientos de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ Elaborados
por Proyección Térmica en Componentes Metálicos: Estado del Arte

Julio Cesar Viáfara Martínez

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Mauricio Rincón Ortiz

Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirector

Andrés Giovanni González Hernández

Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Primeramente, agradecer a DIOS por haberme permitido llegar hasta este punto; por haberme dado salud y fuerzas para afrontar las adversidades y lograr mis objetivos.

A mi madre MABELYS MARTÍNEZ VIDALES, mi padre JULIO CESAR VIÁFARA y mis hermanas ANA CRISTINA VIÁFARA MARTÍNEZ y MARGARETH VIÁFARA MARTÍNEZ. Por haberme apoyado en todo momento; por sus consejos y motivación constante para culminar este gran objetivo.

A mis compañeros universitarios especialmente SILVIA MATAJIRA, DANIEL CAÑAS, SERGIO REYES, CARLOS POSSO, ANGGIE GARCÍA Y DANIELA ESTUPIÑAN, por su amistad y apoyo incondicional en cada momento.

A la selección de rugby de la UIS por permitirme desarrollar habilidades deportivas durante gran parte de mi vida universitaria y conocer excelentes personas.

Finalmente, a los profesores ANDRÉS GIOVANNI GONZÁLEZ HERNÁNDEZ Y MAURICIO RINCÓN ORTIZ, por la paciencia, dedicación y apoyo para llevar a cabo paso a paso este proyecto.

Julio Cesar Viáfara Martínez

Agradecimientos

A los profesores de la escuela de Ingeniería Metalúrgica por la formación profesional brindada.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander-VIE, por financiar este trabajo de grado, a través del proyecto No. 2512, titulado “Evaluación de la microestructura, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de recubrimientos de Cr_2O_3 y $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ elaborados a partir de proyección térmica por combustión para aplicaciones en ambientes marinos”.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Objetivos.....	11
2. Proyección térmica	12
3. Recubrimientos cerámicos.....	14
3.1 Recubrimiento de óxido de cromo (Cr_2O_3).....	14
3.2 Recubrimientos de alúmina (Al_2O_3)	16
4. Procesos de proyección térmica más usados para recubrimientos cerámicos como la Al_2O_3 y el Cr_2O_3	16
4.1 Sistemas de proyección térmica por combustión.....	16
4.1.1 Proyección térmica por llama de baja velocidad (<i>Flame Spray</i>)	16
4.1.2 Proyección térmica por llama de alta velocidad (HVOF)	18
4.2 Sistemas de proyección térmica por plasma	19
4.2.1 Proyección térmica por plasma atmosférico (APS)	19
5. Efecto de los parámetros de manufactura en la microestructura de los recubrimientos	20
5.1 Temperatura de la llama o gas ionizante.....	20
5.2 Materia prima y distribución de tamaño de partícula	21
5.3 Porosidad en los recubrimientos elaborados por proyección térmica	22
5.4 Adherencia y morfología del splat en la superficie del sustrato	23
5.5 Microestructura del recubrimiento.....	25
5.6 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de alúmina	25
5.7 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de óxido de cromo	28
5.8 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de Cr_2O_3 - Al_2O_3	30
6. Capacidad protectora de los recubrimientos de Cr_2O_3 y Al_2O_3 proyectados por la técnica de proyección térmica ..	35
6.1 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de alúmina	35
6.2 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de óxido de cromo	37
6.3 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de Cr_2O_3 - Al_2O_3	40
7. Conclusiones.....	42
Referencias bibliográficas	45
Apéndices	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Procesos de proyección térmica usados en diferentes sectores industriales.	12
Tabla 2. Procesos de proyección térmica según su forma de aplicar la energía al sistema de proyección.	13
Tabla 3. Influencia de la relación de gases en la resistencia a la corrosión para el óxido de cromo elaborado por Flame Spray.	18
Tabla 4. Parámetros generales de manufactura para la proyección de materiales cerámicos mediante diferentes procesos de la proyección térmica.	20
Tabla 5. Porcentaje de porosidad del óxido de cromo y la alúmina según el sistema de proyección térmica.	23
Tabla 6. Efecto de la variación del parámetro crítico de proyección por plasma en un recubrimiento de alúmina proyectado por plasma atmosférico.	28
Tabla 7. Características físicas, mecánicas y microestructurales de Cr_2O_3 , Al_2O_3 y $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ proyectados por plasma atmosférico.	33
Tabla 8. Comparación del efecto de los parámetros de manufactura y propiedades mecánicas de los sistemas de recubrimiento $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ proyectado por plasma atmosférico.	34
Tabla 9. Comparación de la capacidad protectora de la alúmina proyectado por Flame Spray y plasma sobre un sustrato de acero.	35
Tabla 10. Características microestructurales, valores de las tasas de desgaste y corrosión para los tres sistemas de proyección usando alúmina como materia prima.	37

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Velocidad y temperatura de fusión de materiales generalmente usados en proyección térmica.	14
Figura 2. Aguja de tobera de turbina Pelton: A) desgastada tras 1.000 horas de servicio, B) aguja con recubrimiento de óxido de cromo para prevenir desgaste.....	15
Figura 3. Esquema de las diferentes clases de llama oxiacetilénica.	18
Figura 4. Splats formadas por proyección de partículas cerámicas por plasma atmosférico, sobre la superficie de un acero inoxidable: a. $T_{\text{sustrato}}=27^{\circ}$; b. $T_{\text{sustrato}}=340^{\circ}\text{C}$	24
Figura 5. Micrografía SEM de la sección transversal de un recubrimiento de tungsteno proyectado por plasma atmosférico: (a)estructura laminar; (b)estructura de grano columnar dentro de los splats.	25
Figura 6. Micrografías OM (Microscopio Óptico) de recubrimientos de Cr_2O_3 proyectados con plasma (a)-(b) sin y (c)-(d) con limpieza criogénica.....	30
Figura 7. Sección transversal de la muestra recubierta por óxido de cromo: a) Antes del proceso de corrosión; b) Después del proceso de corrosión.	38
Figura 8. Detalles de las cicatrices de desgaste en el óxido de cromo Cr_2O_3 proyectado con llama de alta velocidad después de la prueba pin on disk.	40
Figura 9. Sección transversal del recubrimiento $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, capa aluminizada, capa base y sustrato proyectado por plasma atmosférico.	41

Listado de apéndices**Pág.**

Apéndice A. Ubicación de la aguja de tobera de turbina dentro de la turbina Pelton(Perez Remesal & Renedo Estebanez, 2019).....	59
Apéndice B. Sistema de proyección térmica por llama de baja velocidad (<i>Flame Spray</i>) (S.A., 2007).....	59
Apéndice C. Sistema de proyección térmica por llama de alta velocidad (HVOF) (S.A., 2007)	60
Apéndice D. Sistema de proyección térmica por plasma atmosférico (APS) (S.A., 2007)	60

Resumen

Título: Estudio de la capacidad protectora de los recubrimientos de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ elaborados por proyección térmica en componentes metálicos: Estado del arte¹

Autor: Julio Cesar Viáfara Martínez²

Palabras Clave: Recubrimientos, Alúmina, Capacidad Protectora, Proyección Térmica, Óxido de Cromo.

Descripción:

La protección superficial de un equipo ante condiciones de trabajo severas es tan importante como un correcto diseño y elección de materiales de fabricación. Por ello, este proyecto presenta una revisión de las investigaciones realizadas en los últimos 20 años de los procesos de la técnica de proyección térmica utilizando materiales cerámicos como el óxido de cromo y la alúmina para elaborar recubrimientos que brinden protección contra la corrosión y el desgaste a la superficie de un equipo o componente. Se seleccionaron los procesos más utilizados en la proyección de materia prima cerámica, para ello se consideró la energía térmica y cinética que pueden proporcionar los sistemas de proyección a las partículas y las características físicas-mecánicas de los óxidos a proyectar. Se encontró que para ambos óxidos la capacidad protectora cambia según las características microestructurales, el sistema de proyección y sus parámetros de manufactura. En la protección contra la corrosión, la alúmina presenta mejores características de protección que el óxido de cromo debido a sus excelentes características microestructurales, las cuales impiden la fácil difusión del electrolito hasta el sustrato. En condiciones de desgaste, el óxido de cromo muestra mejores resultados ante estas condiciones ya que forma una capa superficial compacta y suave, la cual reduce la pérdida de material. Actualmente, se siguen investigando los recubrimientos elaborados con esta técnica y materia prima de naturaleza cerámica.

¹ Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director Mauricio Rincón Ortiz. Dr. en ciencia y tecnología de materiales. Andrés Giovanni Gonzales Hernández. Dr. en ciencia y tecnología de materiales.

Abstract

Title: Study of the protective capacity of Cr_2O_3 - Al_2O_3 coatings elaborated by thermal spraying in metallic components: State of the art³

Author: Julio Cesar Viáfara Martínez⁴

Key Words: Coatings, Alumina, Protective Capacity, Thermal Spray, Chromium Oxide.

Description:

The surface protection of equipment against severe working conditions is as important as a correct design and choice of manufacturing materials. For this reason, this project presents a review of the most research carried out in the last 20 years of the processes of the thermal spray technique using ceramic materials such as chromium oxide and alumina to elaborate coatings that provide protection against corrosion and wear to the surface of equipment or component. The most used processes for the spraying of ceramic raw material were selected, considering the thermal and kinetic energy that the spraying systems can provide to the particles and the physical-mechanical characteristics of the oxides to be sprayed. It was found that for both oxides the protective capacity changes according to the microstructural characteristics, the spray system, and its manufacturing parameters. In the protection against corrosion, alumina has better protection characteristics than chromium oxide due to its excellent microstructural characteristics, which prevent the easy diffusion of the electrolyte to the substrate. In wear conditions, chromium oxide shows better results under these conditions as it forms a compact and smooth surface layer, which reduces material loss. Currently, the coatings made with this technique and raw material of a ceramic nature are still being investigated.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director Mauricio Rincón Ortiz. Dr. en ciencia y tecnología de materiales. Codirector Andrés Giovanni Gonzales Hernández. Dr. en ciencia y tecnología de materiales.

Introducción

La superficie de los componentes de un equipo en servicio está expuesta a un deterioro constante el cual aumenta con el paso del tiempo, ya sea por condiciones ambientales agresivas (atmósfera corrosiva) o por cargas aplicadas de tensión, compresión o fatiga, entre otras. Debido a esta condición de deterioro resulta importante realizar una correcta elección de los materiales de fabricación, del diseño y mantenimiento de las piezas, con el fin de establecer las condiciones de trabajo que pueden soportar cada uno de los componentes, buscando con esto aumentar la vida útil de las piezas en servicio. Como solución a este problema se han desarrollado técnicas que permiten cambiar las propiedades superficiales de la pieza, una de ellas es la proyección térmica; la cual permite reparar, modificar y mejorar las propiedades superficiales de un material a través de la proyección de partículas fundidas o semifundidas, potenciando la resistencia al desgaste, a la corrosión y a las altas temperaturas del sustrato.

La finalidad de este proyecto es presentar un estado actual de las investigaciones y aplicaciones que se han realizado sobre los procesos de la técnica de proyección térmica a través de la proyección de materia prima cerámica⁵ (Al_2O_3 y Cr_2O_3) como recubrimientos superficiales en sustratos metálicos, evaluando la resistencia a la corrosión y la resistencia al desgaste. Para el desarrollo de este proyecto se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica (tesis doctoral, libros y revistas) mediante el uso de recursos electrónicos como las bases de datos: Science Direct, Scopus Springer, Google Scholar, Researchgate. Con esta búsqueda se proporcionará información a diferentes tipos de industrias: Química, Petroquímica, Aeronáutica, Automotriz, Naval entre otras; en la fabricación de recubrimientos a base de materiales cerámicos.

⁵ Los materiales cerámicos en comparación con los metales y polímeros brindan mayor capacidad protectora ante ambientes de corrosión y desgaste a equipos y componentes, lo cual los hace una buena opción como recubrimiento superficial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar, mediante revisión bibliográfica, el estudio de la capacidad protectora de los recubrimientos de Cr_2O_3 - Al_2O_3 elaborados por proyección térmica en componentes metálicos: Estado del arte.

1.2 Objetivos específicos

Identificar las técnicas de proyección térmica más utilizadas para la elaboración de recubrimientos cerámicos como Al_2O_3 y Cr_2O_3 .

Analizar la influencia de los parámetros de manufactura en la microestructura de los recubrimientos de Al_2O_3 y Cr_2O_3 bajo las técnicas de proyección térmica más utilizadas.

Comparar la resistencia a la corrosión y al desgaste de los recubrimientos de Al_2O_3 y Cr_2O_3 elaborados bajo las técnicas de proyección térmica más utilizada en sustratos metálicos.

2. Proyección térmica

El término "proyección térmica" describe una familia de procesos que utilizan la generación de energía térmica alimentado por métodos químicos (combustión) o eléctricos (plasma o arco) para la proyección de partículas fundidas o semifundidas, las cuales son proyectadas a velocidades que oscilan entre 50-1000 m/s (165-3300 pies/s)(Fischer et al., 2012; International & Associates, 2004). Una de las principales ventajas de los procesos de la proyección térmica es la amplia variedad de materiales disponibles como: metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos; los cuales pueden ser utilizados para elaborar recubrimientos. (M. A. S. Zavareh, 2017). Prácticamente cualquier material que se funda sin descomponerse puede ser usado para su proyección (J. R., 2001) (Gao, Li, Li, Yang, & Li, 2008).

Gracias a la versatilidad de cada uno de sus sistemas de proyección, se pueden elaborar recubrimientos con rangos de espesor que oscilan entre 80 y 500 μm , lo cual proporciona mayor variedad en aplicaciones. Esta técnica permite ser aplicada en la mayoría de industria gracias a su alta eficiencia y gran desarrollo a través de los años. En la tabla 1 se muestran algunos de los sectores de la industria en los que se ha hecho uso de la proyección térmica (Coating & Chemical, 2004).

Tabla 1

Procesos de proyección térmica usados en diferentes sectores industriales.

Sector industrial	Flame Spray	HVOF	D-Gun	APS
Aeronaves	X	X	X	X
Automovilismo	X	X		X
Fabricación y reparación naval	X			
Gas y petróleo	X	X	X	X
Turbinas de Aero-gas	X	X	X	X

Nota. Tomado y adaptado de "Handbook of thermal spray technology", por J. R. Davis, 2004. ASM International.

En el 2001 el comando marítimo de la marina de los Estados Unidos implementó la NORMA MILITAR 1687 (MIL-STD-1687), en la que se estipula que toda embarcación militar y comercial con degradación estructural, deben ser sometidas a procesos de proyección térmica para la reparación y puesta a punto (Hincapie Campos, 2013; National & Manual, 2001). En la industria del gas y el petróleo los procesos de proyección térmica como la proyección a alta velocidad (HVOF) y proyección por plasma atmosférico son usados para elaborar recubrimientos superficiales los cuales protegen los equipos de la corrosión (general y localizada) y del desgaste (Hardwicke & Lau, 2013), esto es gracias a los parámetros de manufactura de cada proceso (Akhtari Zavareh et al., 2016; M. A. Zavareh et al., 2014). Actualmente es objeto de estudio la optimización de los sistemas de proyección de cada uno de los procesos de la técnica; uno de los objetivos es buscar disminuir el consumo de energía química o eléctrica durante la proyección, usar materiales de recubrimiento con granulometría nanométrica o en suspensión y disminuir el tiempo de proyección sin bajar la calidad del recubrimiento (Shahien & Suzuki, 2017).

Los procesos de proyección térmica se agrupan en tres categorías principales: proyección de llama o combustión, proyección por arco eléctrico y proyección por plasma. La tabla 2 muestra los diferentes procesos de la técnica divididos en las tres categorías (Ferrer et al., 2019; Wank, 2010; M. A. S. Zavareh, 2017).

Tabla 2

Procesos de proyección térmica según su forma de aplicar la energía al sistema de proyección.

Combustión	Plasma	Arco eléctrico
Llama de baja velocidad (<i>Flame Spray</i>)	Plasma atmosférico (APS)	Arco voltaico
Llama de alta velocidad (HVOF)	Plasma al vacío (VPS)	
Denotación D-Gun		

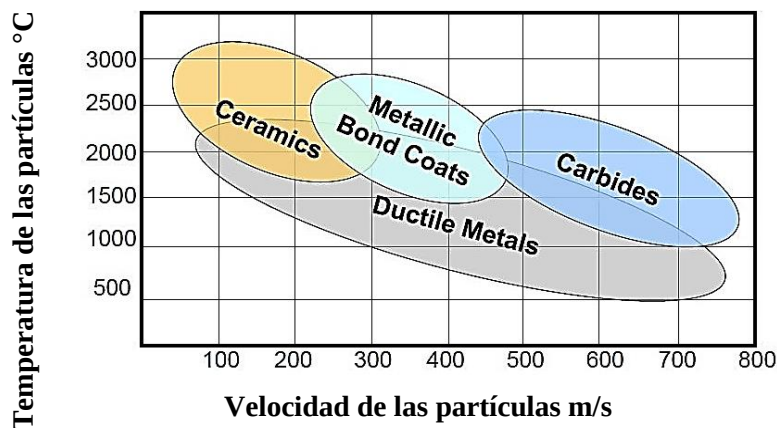
Nota. Información tomada de “Definición y usos de la proyección térmica” (p.29), M. Ferrer et al., 2019.

3. Recubrimientos cerámicos

Los materiales cerámicos presentan excelentes propiedades naturales que pueden ser aprovechadas para brindar a componentes ventajas adicionales tales como: gran dureza superficial, resistencia eléctrica, al desgaste, a la corrosión, entre otras. La elaboración de recubrimientos a partir de materiales cerámicos sobre sustratos metálicos permite aumentar el número de aplicaciones que pueden tener estos materiales (metálicos), debido a que se mejora su capacidad protectora (Dimaté Castllanos, 2011; Klyastkina, 2012; Lima & Marple, 2007). Los materiales cerámicos requieren sistemas de proyección que generen altas temperaturas y velocidades de proyección no tan altas en comparación con otros materiales (carburos), tal como lo muestra la figura 1 (International, 2014).

Figura 1

Velocidad y temperatura de fusión de materiales generalmente usados en proyección térmica.



Nota. Figura tomada de “Documento técnico sobre tecnología de termo-pulverizado” (p.4), por A. International, 2014, ASM International. Cerámicas: Cerámicos, Metallic Bond Coats: Capa de Adherencia Metálica, Carbides: Carburos, Ductile Metals: Metales Dúctiles.

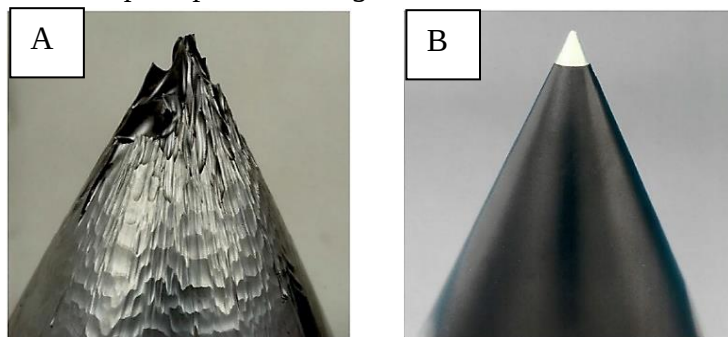
3.1 Recubrimiento de óxido de cromo (Cr_2O_3)

El óxido de cromo (Cr_2O_3) es un compuesto inorgánico con características aptas para ser usado como recubrimiento, además tiene un punto de fusión de 2435°C y es ampliamente usado como material resistente al desgaste, fricción y corrosión de componentes ingenieriles de las

industrias aeroespacial, marina, química, entre otras (A. Cellard et al., 2009). El material presenta una estructura anisotrópica tras ser usado por proyección térmica, tiene una fase cristalográfica principal llamada eskolaíta, la cual le proporciona al recubrimiento una alta capacidad protectora frente a ambientes de desgaste o corrosión. Este tipo de recubrimiento al estar en condiciones de desgaste por deslizamiento forma una capa compacta y suave en la superficie e impide que pueda ser desgastado con facilidad en comparación con otros óxidos como la Al_2O_3 y $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (Giovanni Bolelli et al., 2006, 2021). (Dimate Castellanos et al., 2017). En la figura 2A, se observa una aguja de tobera de turbina Pelton que presenta un alto desgaste en la zona del vértice tras 1.000 horas de servicio, mientras que en la figura 2B se observa otra aguja que ha sido recubierta por óxido de cromo a través del proceso de llama oxiacetilénica (*Flame Spray*) y que fue sometida a las mismas condiciones de la figura 2A. La figura 2B presenta un estado superficial mejor debido a la capa protectora de óxido de cromo, la cual aumentó la resistencia al desgaste del componente (Sulzer Metco, 2016). En el apéndice A se muestra la ubicación de la aguja de tobera de turbina dentro de la turbina Pelton (Perez Remesal & Renedo Estebanez, 2019).

Figura 2

Aguja de tobera de turbina Pelton: A) desgastada tras 1.000 horas de servicio, B) aguja con recubrimiento de óxido de cromo para prevenir desgaste.



Nota. Tomado de “An introduction to thermal spray” (p.4), por Sulzer Metco, 2016.

3.2 Recubrimientos de alúmina (Al_2O_3)

El óxido de aluminio es un compuesto inorgánico químicamente inerte, estable a altas temperaturas y de gran resistencia al desgaste y a la corrosión y tiene un punto de fusión de 2072°C (Cervera González, 2011; Ferrer et al., 2013). La alúmina cuando es proyectada por procesos de la técnica de proyección térmica presenta diferentes fases cristalográficas como: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\lambda\text{-Al}_2\text{O}_3$ las cuales depende a su vez de la velocidad de enfriamiento del *splat*⁶. Estas fases afectan en mayor o menor medida las propiedades mecánicas del recubrimiento como la tenacidad a la fractura y la capacidad protectora que este puede brindar ante ambientes de corrosión o desgaste (Aruna et al., 2012; Michalak et al., 2020; Restrepo et al., 2012). La alúmina puede ser mezclada con otros óxidos como el óxido de cromo (Cr_2O_3) para aumentar su capacidad protectora o con el óxido de titanio (TiO_2) para mejorar algunas características microestructurales como disminuir la porosidad del recubrimiento (Iwaszko, 2006; Kafkaslıoğlu Yıldız et al., 2019).

4. Procesos de proyección térmica más usados para recubrimientos cerámicos como la

Al_2O_3 y el Cr_2O_3

Los sistemas de proyección que se presentan a continuación se diferencian fundamentalmente por la energía térmica y cinética que se transmite a las partículas en cada proceso (Sulzer Metco, 2016).

4.1 Sistemas de proyección térmica por combustión

4.1.1 Proyección térmica por llama de baja velocidad (*Flame Spray*)

En este tipo de proyección la materia prima a proyectar puede estar en forma de polvos o en forma de alambre o hilo. Se caracteriza por una baja inversión de capital, altas tasas de deposición y bajo coste en el mantenimiento del equipo. Además, este sistema permite recubrir

⁶ Splat: Partícula fundida o semifundida que impacta y se adhiere a la superficie de sustrato tras ser proyectada.

piezas de grandes dimensiones y diversas geometrías debido a la versatilidad del sistema de proyección, en el apéndice B se muestra el sistema de proyección, el cual es conocido en inglés como “*Flame Spray*”. Los recubrimientos proyectados por este proceso presentan menor fuerza de adherencia (recubrimiento/sustrato), alto porcentaje de porosidad y pueden transferir mayor calor al sustrato durante la proyección en comparación con los demás procesos de la técnica (Paper et al., 2012b). Sin embargo, si hay un buen control de los parámetros de proyección, estas variables pueden ser iguales a las de los otros procesos de proyección. Por otro lado, el combustible utilizado en la proyección térmica por llama se escoge de acuerdo con su valor calorífico y a la temperatura máxima que puede alcanzar, donde el acetileno es uno de los combustibles con mayor uso para la elaboración de recubrimientos metálicos y cerámicos (Ferrer et al., 2019). El sistema de proyección por llama (*Flame Spray*) permite modificar las propiedades y características microestructurales del recubrimiento con solo cambiar la relación de los gases⁷ del sistema de proyección, como lo evidenció Howard Nuñez en su investigación, en la cual comparó la proyección de partículas de óxido de cromo sobre un acero AISI-SAE 1020 con una relación de gases oxidante y una neutra, tal como lo muestra la tabla 3 (Nuñez Celis, 2020). Los resultados muestran que el recubrimiento elaborado con la relación de gases que da paso a una llama de carácter oxidante tiene una velocidad de corrosión más baja y mejores características microestructurales (baja porosidad) en comparación con la relación de gases utilizada para la generación de una llama del tipo neutra. Lo anterior, está relacionado con que la llama oxidante presenta una zona caliente más larga en la cual las partículas van a estar más tiempo, haciendo que lleguen mayor número de partículas en estado fundido a la superficie del sustrato, en comparación

⁷ La relación de gases varía de neutra a oxidante con el aumento del comburente en este caso el oxígeno.

de la llama neutra la cual tiene una zona caliente más corta; tal como la muestra la figura 3 (Ferrer et al., 2019).

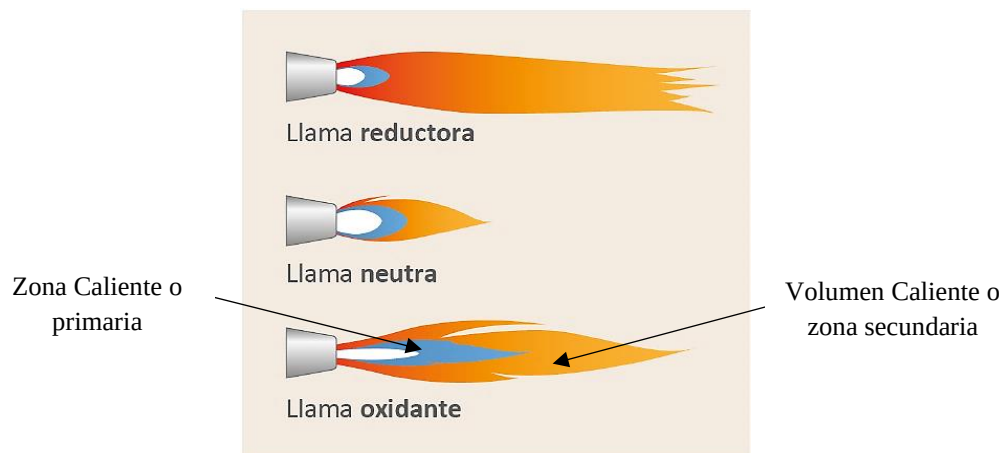
Tabla 3

Influencia de la relación de gases en la resistencia a la corrosión para el óxido de cromo elaborado por Flame Spray.

Relación de gases	Porosidad %	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Espesor del recubrimiento (μm)	Velocidad de corrosión (mm/año)
Oxidante	2.54	4.10	114.95	0.05
Neutra	4.47	15.53	214.60	0.18

Figura 3

Esquema de las diferentes clases de llama oxiacetilénica.



Nota. Figura tomada de “Definición y usos de la proyección térmica” (p.36), por M. Ferrer, M. Moreno, (2019).

4.1.2 Proyección térmica por llama de alta velocidad (HVOF)

El proceso de HVOF se caracteriza principalmente por la alta velocidad y gran adherencia que pueden adquirir las partículas proyectadas con la superficie de un sustrato. La energía cinética obtenida por las partículas durante su proyección se debe a la combustión a alta presión de los gases acetileno y oxígeno al interior de una cámara de combustión que tiene el sistema de proyección, tal como lo indica el número 6 del apéndice C (Sulzer Metco, 2016). Este proceso permite el uso de materia prima en suspensión, tal como lo explican los investigadores Jarkko kiilakoski et al., en su estudio, a través del cual elaboraron un recubrimiento por el proceso de HVOF con partículas nanométricas de Cr_2O_3 en suspensión. Los autores concluyen que el uso de

partículas nanométricas de óxido de cromo en suspensión, combinadas con las condiciones de operación del sistema de proyección brindan al recubrimiento altos valores de microdureza, excelente rendimiento al desgaste por deslizamiento y resistencia a la corrosión. Esto es debido principalmente a que las partículas en suspensión tienen un tamaño de partícula más pequeño que el método convencional (materia prima en polvo) (Aghasibeig et al., 2019), por lo que al ser proyectadas se funden con mayor facilidad y pueden generar un recubrimiento más denso y finamente estructurado (Kiilakoski et al., 2019).

4.2 Sistemas de proyección térmica por plasma

4.2.1 Proyección térmica por plasma atmosférico (APS)

El plasma es producido por un arco voltaico en una atmósfera inerte de argón⁸ o una mezcla de argón e hidrógeno, la temperatura que puede alcanzar el plasma oscila entre los 6000 a 16000°C. En este sistema de proyección la materia prima en polvo se inyecta justo a la salida de la boquilla para tener más control de las partículas fundidas (S.A., 2007). Gracias a las altas temperaturas del sistema de proyección por plasma atmosférico las partículas al impactar en el sustrato casi siempre lo van a hacer como partículas fundidas. Por lo tanto, el porcentaje de porosidad del recubrimiento va a ser muy bajo en comparación con el proceso de *Flame Spray* (M. A. S. Zavareh, 2017). El campo de aplicación más importante de la proyección de plasma atmosférico es la elaboración de recubrimientos cerámicos. Los recubrimientos cerámicos obtenidos por plasma son comúnmente usados para la protección de los metales contra la corrosión, la oxidación a alta temperatura y el desgaste (Erickson et al., 2001; Gell et al., 2001; Wank, 2010). En el apéndice D se muestra el sistema de proyección por plasma atmosférico.

⁸ El argón se escoge generalmente porque es químicamente inactivo y tiene grandes cualidades de ionización.

5. Efecto de los parámetros de manufactura en la microestructura de los recubrimientos

En la manufactura de un recubrimiento es muy importante realizar una correcta preparación superficial del sustrato porque este define el anclaje mecánico, físico y metalúrgico de las partículas proyectadas. Tras realizar la preparación superficial se debe garantizar que la interacción de las partículas con la llama o plasma sea la adecuada, de este modo se controla la trayectoria, temperatura, velocidad y ángulo de impacto de las partículas sobre el sustrato (Ferrer et al., 2019). En la Tabla 4 se presentan los rangos generales de algunos procesos de la técnica de proyección térmica en la manufactura de un recubrimiento cerámico (Hincapie Campos, 2013; Sulzer Metco, 2016).

Tabla 4

Parámetros generales de manufactura para la proyección de materiales cerámicos mediante diferentes procesos de la proyección térmica.

Parámetros generales de manufactura	Procesos de la técnica de proyección térmica		
	Flame Spray	HVOF	APS
Temperatura de la llama o gas ionizante (°C)	3000	2600-3000	6000-16000
Velocidad de proyección (m/s)	≤50	≤700	300-550
Adherencia (MPa)	14-34	40-69	20-60
Distribución de tamaño de partícula (μm)	10-110	<15	<45
Tasa de deposición (kg/hr)	2-6	1-11	2-9
Porosidad en materiales (%)	5-15	1-10	1-10
Espesor típico de recubrimientos (mm)	0.5-1.5	0.05-0.5	0.1-0.8

Nota. Tabla adaptada de “Definición y usos de la proyección térmica” (p.36), por M. Ferrer, M. Moreno, 2019. “An introduction to thermal spray” (p.4), por Sulzer Metco, 2016. “Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos comerciales de metaceram 25050 y proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama” por W. Hincapie, 2013, Universidad de Nacional de Colombia.

5.1 Temperatura de la llama o gas ionizante

Para garantizar que los materiales con temperaturas altas de fusión lleguen a estar fundidos o semifundidos al momento de impactar con la superficie del sustrato, la temperatura del plasma o de la llama debe estar unos cientos grados centígrados por encima de la temperatura de fusión de las partículas, por ejemplo para el óxido de cromo y la alúmina los sistemas de proyección térmicos deben generar temperaturas por encima de 2435 y 2072°C respectivamente (Ferrer et al.,

2019). En el caso del proceso *Flame Spray* cuando las partículas entren en contacto con la zona caliente generada por la combustión de los gases, estas alcanzaran rápidamente el 70% de la temperatura de la llama ($0,7 \cdot T_m^9$), y luego su temperatura subirá muy lentamente. Por ejemplo, con una llama de acetileno y oxígeno aproximadamente se alcanza una temperatura máxima de 3000 °C, será difícil fundir las partículas que requieren una temperatura por encima de un valor de 2100 °C ($0,7 \cdot 3000 = 2100^\circ\text{C}$). Mientras que el proceso de plasma atmosférico genera temperaturas de hasta 16000°C, en este proceso se debe controlar que las partículas no alcancen temperaturas muy por encima del punto de fusión debido a que se pueden evaporar con mayor facilidad (Ferrer et al., 2019). Por último, para el proceso HVOF la transferencia de calor a las partículas va a depender no solo de la temperatura generada por la combustión de los gases, sino también de parámetros de proyección como velocidad del gas portador y la velocidad de alimentación del polvo. Un factor a considerar en el proceso de HVOF es que la materia prima en polvo se debe inyectar de manera axial a la cámara de combustión, ya que si se hace de manera radial los gases de combustión en esta ubicación no transfieren todo el poder calorífico a las partículas y el tiempo de interacción con la llama es más corto (Wank, 2010).

5.2 Materia prima y distribución de tamaño de partícula

La materia prima requerida en los procesos de proyección térmica puede ser preparada de manera convencional (en polvo o alambre) o por suspensión (polvo + solvente). Los recubrimientos realizados por suspensión han generado un gran interés para la ingeniería de superficies de materiales, debido a que los recubrimientos pueden presentar mejores características microestructurales como: microestructura laminar delgada, valores de espesor más bajos, menor porosidad y mayor densidad respecto a los recubrimientos convencionales, lo que implica mejores

⁹ T_m: Temperatura de fusión.

características microestructurales respecto a la alternativa convencional (Darut, 2010; Paper et al., 2012a). Para las dos alternativas la materia prima usada generalmente son partículas de polvo, las cuales pueden tener un tamaño de partícula entre los 5-100 micrómetros para el método convencional y para el método por suspensión el tamaño de partícula es menor a 5 micrómetros. El tamaño de partícula es definido por: el tipo de material (su punto de fusión) y el proceso de proyección a usar: APS, HVOF, *Flame Spray*, entre otros, lo que se busca es lograr condiciones de procesamiento óptimas con el fin de fabricar recubrimientos para aplicaciones específicas (Aghasibeig et al., 2019).

5.3 Porosidad en los recubrimientos elaborados por proyección térmica

Los recubrimientos de proyección térmica pueden contener distintos niveles de porosidad y van a depender del proceso de proyección elegido, la distancia de proyección, el espesor del recubrimiento, la distribución de tamaño y velocidad de las partículas (Sarikaya, 2005). La porosidad puede generar una pobre cohesión entre los *splats* y conducir a una fractura prematura del recubrimiento (Dimaté Castllanos, 2011; International & Associates, 2004). La elevada porosidad puede conducir a la interconexión de los poros y provocar que los agentes corrosivos lleguen con relativa facilidad al sustrato, produciéndose ataques que pueden acelerar el proceso de delaminación de la interfaz entre el recubrimiento y el sustrato. La porosidad se puede disminuir variando parámetros de manufactura como la velocidad de proyección o proyectando partículas totalmente fundidas (International & Associates, 2004). Para recubrimientos resistentes al desgaste como el óxido de cromo o la alúmina, altos valores de porosidad disminuye la dureza del recubrimiento y contribuye a pobres acabados superficiales, por ende disminuye la resistencia al desgaste y a la corrosión respectivamente (International & Associates, 2004). Los recubrimientos de óxido de cromo elaborados por *Flame Spray* generalmente tiene un porcentaje de porosidad más alto en comparación con la alúmina, es debido a las bajas temperaturas que los polvos logran

alcanzar durante su proyección hacia el sustrato y no alcanzan a generar las partículas fundidas suficientes para llenar los vacíos y compactar el recubrimiento (International & Associates, 2004). En los procesos de plasma atmosférico y HVOF, los porcentajes de porosidad son más bajos que en el proceso de *Flame Spray* para ambos óxidos, debido a la alta temperatura del plasma y gran energía cinética respectivamente. La tabla 5 muestra los porcentajes de porosidad para cada proceso (Gao et al., 2002; Hincapie Campos, 2013).

Tabla 5

Porcentaje de porosidad del óxido de cromo y la alúmina según el sistema de proyección térmica.

Sistema de proyección	Porcentaje de porosidad	
	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Flame Spray	7-11	9-14
HVOF	4-8	
APS	5-10	

Nota. Información tomada de “Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos comerciales de metaceram 25050 y proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama” por W. Hincapie, 2013, Universidad de Nacional de Colombia y “High hardness alumina coatings prepared by low power plasma spraying” por Y. Gao et al., 2002, Surface and Coatings Technology.

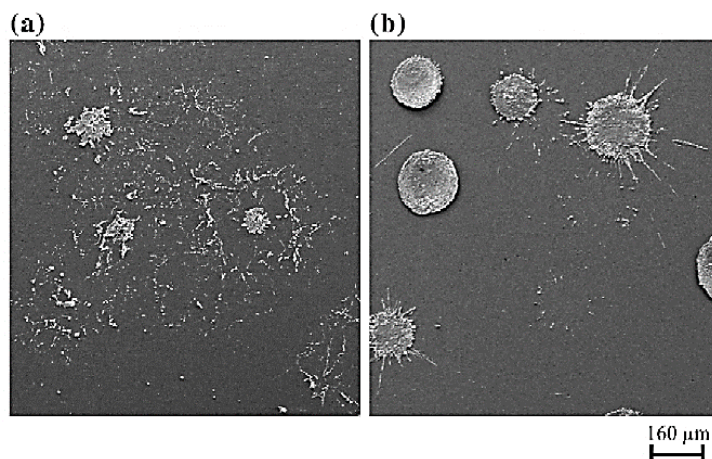
5.4 Adherencia y morfología del splat en la superficie del sustrato

Los *splats* pueden variar su morfología en la superficie del sustrato según sea la temperatura de este, a baja temperatura del sustrato (25 a 70°C) los *splats* se fracturan tras impactar con la superficie y generan una nube de pequeñas *splats* con bordes irregulares, debido a que no soportan este cambio brusco de temperatura, como se muestra en la figura 4a (Dhiman et al., 2007; Nandiyanto & Okuyama, 2011). El calentamiento de la superficie del sustrato a temperaturas entre 200 y 550°C durante la proyección de las partículas mejora la cohesión entre las *splats* y su adherencia con el sustrato. Tal como lo demostraron los investigadores Cedelle, Fukanuma et al., los cuales concluyeron en sus investigaciones que aplicar un calentamiento al sustrato durante la proyección de las partículas, ayuda a eliminar contaminantes y genera un cambio a escala nanométrica en la topología de la superficie que puede mejorar la humectabilidad y disminuir la

velocidad de enfriamiento de las *splats* en el impacto, produciendo así *splats* de tipo disco como se muestra en la figura 4b, las cuales son más estables y proporcionan al recubrimiento menos porosidad y mayor densidad (Cedelle et al., 2006; Dhiman et al., 2007; Fukanuma et al., 2009).

Figura 4

Splats formadas por proyección de partículas cerámicas por plasma atmosférico, sobre la superficie de un acero inoxidable: a. $T_{\text{sustrato}}=27^{\circ}$; b. $T_{\text{sustrato}}=340^{\circ}\text{C}$.



Nota. Figura tomada de “Predicting splat morphology in a thermal spray process” (p.7791), por R. Dhiman et al., 2007, Surface and Coatings Technology.

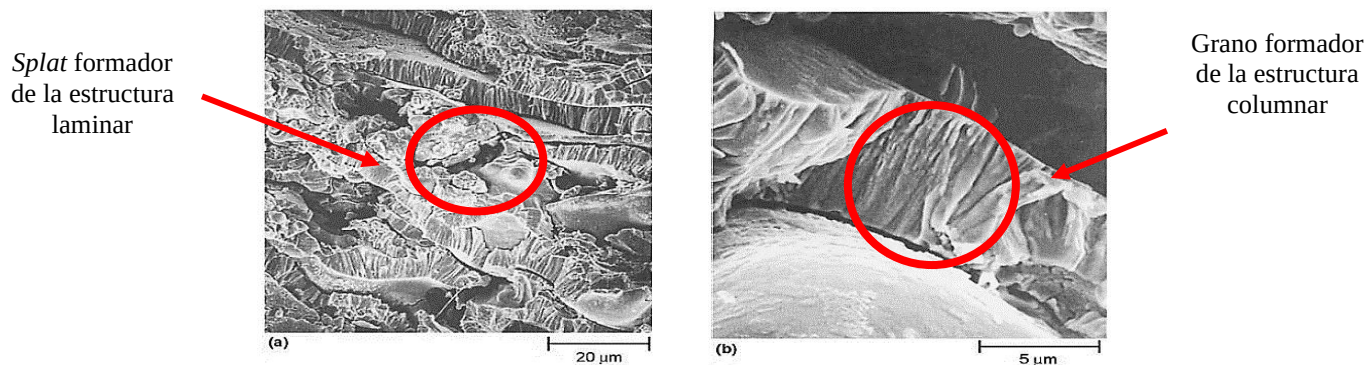
La superficie caliente del sustrato además de mejorar las características microestructurales también favorece el aumento de propiedades mecánicas del recubrimiento como lo es la microdureza; como lo demostró Sarikaya et al. En este estudio se proyectaron partículas de alúmina a través de plasma atmosférico sobre un sustrato previamente precalentado a 500°C , donde los niveles de microdureza aumentaron un 24%, mientras que los de porosidad y rugosidad disminuyeron en hasta un 33 y 1% respectivamente, en comparación cuando se proyectaba las partículas en un sustrato a temperatura ambiente (Sarikaya, 2005). Entre los procesos *Flame Spray*, APS y HVOF, este último es el que proporciona mayor adherencia y cohesión de las *splats*, debido a las condiciones de operación del sistema de proyección, como lo es la alta energía cinética de las partículas proyectadas.

5.5 Microestructura del recubrimiento

La microestructura de los recubrimientos elaborados mediante procesos de proyección térmica, por lo general tiene un tamaño de grano fino y una microestructura laminar; formada por *splats* con orientación columnar debido a su rápido enfriamiento y a la forma de solidificación de los *splats*, como se muestra en la figura 5 (Coating & Chemical, 2004; Dimaté Castellanos, 2011; Morales Torres et al., 2012). Las características de la microestructura van a depender directamente de los parámetros de manufactura del sistema de proyección y de una correcta elección del material para elaborar el recubrimiento. El conocimiento de la forma de la materia prima, la distribución de tamaño de partícula y su proceso de fabricación (mezcla mecánica o pre-aleado) pueden ayudar a mejorar las características microestructurales del recubrimiento (Sulzer Metco, 2016).

Figura 5

Micrografía SEM de la sección transversal de un recubrimiento de tungsteno proyectado por plasma atmosférico: (a) estructura laminar; (b) estructura de grano columnar dentro de los splats.



Nota. Figura tomada de “Una aproximación a la tecnología de proyección térmica” (p.61), por I. José et al., 2012, Avances Investigación en Ingeniería.

5.6 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de alúmina

En la alúmina la fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ es la más deseada ya que brinda al recubrimiento mejores propiedades respecto a las demás fases ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y $\lambda\text{-Al}_2\text{O}_3$). Unas de las maneras de estabilizar la fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ es proyectando partículas totalmente fundidas o teniendo partículas con pequeños núcleos sin fundir y con un enfriamiento lento; de esta forma se evita la estabilización y formación

de las demás fases, esto lo afirman los investigadores Dhiman et al., en sus estudios (Dhiman et al., 2007). Según Sabiruddin et al., cuando se varían los parámetros de manufactura en el sistema de proyección APS esto ayuda a estabilizar la fase α -Al₂O₃ en el recubrimiento. Los investigadores variaron la distancia de proyección entre 75, 100 y 125 mm respecto al sustrato, con un caudal de H₂ y N₂ de 10 y 50 slpm respectivamente. Los resultados muestran que los recubrimientos elaborados con las distancias de proyección de 75 y 125 mm presentaron gran cantidad de la fase α -Al₂O₃ estabilizada. En el caso de la distancia de proyección de 75mm es debido a la gran cantidad de partículas con núcleo sin fundir presentes en el recubrimiento, resultado de la corta distancia entre el sustrato y la salida de las partículas. Por otro lado, la distancia de proyección de 125 mm predomina la cantidad de partículas fundidas las cuales tienden a favorecer la estabilización de la fase α en el recubrimiento tal como lo mencionan los investigadores Dhiman et al., anteriormente (Sabiruddin et al., 2010). Para el caso que se presente la fase γ , se puede realizar un tratamiento térmico entre 1200 y 1400°C al recubrimiento ya elaborado, y la fase γ se transformará ya sea parcial o totalmente en fase α . Sin embargo, no se recomienda hacer un tratamiento térmico al recubrimiento si el sustrato es metálico, ya que la transformación de la fase γ a α viene acompañada de una contracción significativa y esta a su vez puede generar un posible agrietamiento por porosidad o delaminación del recubrimiento (Yang et al., 2011).

Por otra parte, los investigadores Aruna et al., estudiaron el efecto del parámetro crítico de proyección de plasma (CPSP) sobre la microestructura, microdureza y resistencia al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de alúmina proyectados por plasma atmosférico sobre un sustrato de acero inoxidable, tal como se presenta en la tabla 6. El parámetro crítico de proyección de plasma (CPSP) se define como el cociente entre la potencia de salida del plasma y el caudal del

gas primario (Ar)¹⁰. En este caso los autores variaron el potencial de salida del plasma y dejaron constante el caudal de argón. Los resultados mostraron que la formación de fase cristalina α -Al₂O₃ se da principalmente para los recubrimientos elaborados con altos potenciales de salida del plasma (CPSP 825 y 973), es debido a que hay mayor temperatura en el plasma por lo que las partículas que impactan en el recubrimiento estarán gran parte de ellas fundidas. Las características microestructurales del recubrimiento como la porosidad aumentaron a bajo potencial de salida del plasma (CPSP de 675), ya que las partículas semifundidas no se alcanzan a deformar y permiten la formación de defectos, lo cual minimiza la densificación del recubrimiento. El recubrimiento elaborado a bajo potencial de salida (CPSP de 675) presentó una sección transversal basada en zonas fundidas y semifundidas, mientras que el recubrimiento elaborado con el potencial de salida más alto (CPSP 973) presentó una sección transversal más uniforme compuesta por zonas totalmente fundidas. En la capacidad protectora ante el desgaste y la corrosión los recubrimientos elaborados con los potenciales de salida medio (CPSP 825) y alto (CPSP 973) presentaron la menor tasa de desgaste y la más baja densidad de corrosión respectivamente, todo es debido a una excelente cohesión de *splats* y baja presencia de defectos microestructurales (poros o grietas), los cuales impidieron la fácil eliminación de las laminillas superficiales de la estructura del recubrimiento y evitaron la difusión de la solución electrolítica hasta el sustrato (Aruna et al., 2012; Misra et al., 2020).

¹⁰ Cuando se aumenta la potencia de salida del plasma, aumenta la temperatura del plasma y por ende la de las partículas, lo mismo sucede si se disminuye el caudal del gas primario en este caso el argón ya que aumenta el tiempo de permanencia de las partículas en el plasma.

Tabla 6

Efecto de la variación del parámetro crítico de proyección por plasma en un recubrimiento de alúmina proyectado por plasma atmosférico.

CPSP (Potencia del plasma en kW)	Fases cristalinas	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) tras 340 h de inmersión en NaCl	Tasa de desgaste (mm^3/Nm)	Mecanismo de desgaste	Porcentaje de porosidad
675 (27)	Principalmente γ - Al_2O_3 seguida de α - Al_2O_3	4.535	$1.02 \cdot 10^{-3}$	Abrasión	22
825 (33)	Principalmente α - Al_2O_3 seguida de γ - Al_2O_3	1.14	$7.10 \cdot 10^{-4}$		9
973 (37)		1.09	$8.94 \cdot 10^{-4}$		4

Nota. Información tomada de “Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings”, por S. T. Aruna et al., 2012, Surface and Coatings Technology.

Por otro lado, los investigadores Hitesh Vasudev et al., estudiaron las características microestructurales y protectoras de un recubrimiento elaborado con materia prima de nano-alúmina con polvos de Inconel 718, proyectados sobre la superficie de una fundición gris a través del proceso de HVOF. Los autores concluyen que la alúmina mejoró significativamente la microdureza y resistencia a la corrosión del recubrimiento respecto al sustrato, esto se da debido a que las nanopartículas de alúmina reducen la porosidad del recubrimiento y dan un tamaño de grano pequeño a la matriz (Inconel 718), lo cual impide el movimiento de dislocaciones y la difusión del agente corrosivo dentro del recubrimiento. Además, el proceso de HVOF también aportó en el aumento de microdureza gracias a su alta velocidad, la cual proporcionó a las *splats* gran cohesión y adhesión con la superficie del sustrato (Vasudev et al., 2020b, 2020a).

5.7 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de óxido de cromo

Los investigadores Cellard et al., compararon la resistencia al desgaste de recubrimientos de óxido de cromo elaborados con partículas nanométricas vs micrométricas proyectados por medio de plasma atmosférico. Los autores observaron que los polvos nanométricos proporcionan características microestructurales que aumentan en más de 20 veces la resistencia al desgaste en

comparación con los recubrimientos elaborados utilizando polvo con tamaño micrométrico. Este aumento se presenta debido a su microestructura única, compuesta por tamaños de grano equiaxial muy pequeños (inferior a 100nm), baja porosidad y laminillas formadas mayormente por *splats* del tipo disco. Las pocas partículas parcialmente fundidas presentes en el recubrimiento evitaron que las grietas crecieran y se propagaran (An et al., 2017; A. Cellard et al., 2009; Audrey Cellard et al., 2007; Hincapie Campos, 2013; Zois et al., 2008, 2010). Por otra parte, investigadores como Shujuan Dong et al., en uno de sus estudios modificaron la superficie del sustrato a través de la limpieza criogénica¹¹. Emplearon este método de limpieza superficial junto con el proceso de plasma atmosférico para la proyección de óxido de cromo¹² sobre un sustrato de acero 25CrMo4, con el objetivo de buscar disminuir la porosidad, aumentar la adherencia y resistencia al desgaste del recubrimiento. La limpieza criogénica favoreció la densificación del recubrimiento, debido a que las partículas proyectadas al impactar sobre los gránulos de hielo seco hacen que estos se sublimen y generen una atmósfera húmeda, la cual evita que gran parte de estas (partículas de óxido de cromo) se evaporen por la alta temperatura del plasma, aumentando la cantidad de partículas fundidas en el recubrimiento. Gracias a este método de limpieza, la porosidad disminuyó de un 6.6% a un 2.0% y la adherencia mejoró de 13 MPa a 46 MPa. En la figura 6 se puede observar las micrografías tomadas a los recubrimientos sin y con limpieza criogénica respectivamente (Dong et al., 2013b, 2013a). Igualmente, la adherencia aumentó debido a que el hielo seco eliminó contaminantes y disminuyó la rugosidad del sustrato permitiendo que los *splats* se adhieran con mayor facilidad (Dong et al., 2013b). En cuanto a la resistencia al desgaste, el recubrimiento con limpieza criogénica mostró una tasa de desgaste inferior respecto al recubrimiento sin limpieza,

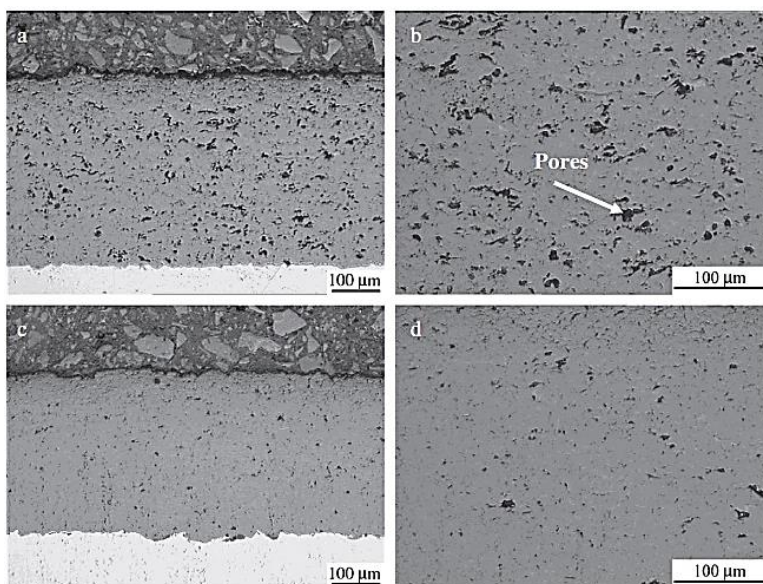
¹¹ Método de limpieza criogénica: Es la proyección de gránulos de hielo seco sobre el sustrato granallado con el plasma o llama (sin proyectar polvo de materia prima), se realiza antes de la proyección de las partículas de polvo.

¹² Usaron parámetros de manufactura altos; con una temperatura del plasma de 9700°C.

debido a que el recubrimiento tiene una estructura laminar muy densa y con pocos defectos micrométricos (poros), permitiendo que las laminillas de la estructura no se desprendan tan fácil por el deslizamiento de la carga (Dong et al., 2013). Según Li et al., los defectos micrométricos como poros o grietas inducen a la delaminación de la estructura laminar del recubrimiento cuando está sometido a condiciones de desgaste (J. F. Li et al., 2004).

Figura 6

Micrografías OM (Microscopio Óptico) de recubrimientos de Cr_2O_3 proyectados con plasma (a)-(b) sin y (c)-(d) con limpieza criogénica.



Nota. Figura tomada de “Microstructure and properties of Cr_2O_3 coating deposited by plasma spraying and dry-ice blasting” (p.60), por S. Dong et al., 2013, Surface and Coatings Technology. Pores: Poros.

5.8 Efecto de los parámetros de manufactura en recubrimientos de Cr_2O_3 - Al_2O_3

Las fases más importantes y con mayor capacidad protectora del Cr_2O_3 y de la Al_2O_3 son las eskolaíta y la α - Al_2O_3 (corindón) respectivamente. Estas fases poseen la misma estructura cristalina y ambos óxidos exhiben una solubilidad total en el estado de equilibrio por encima de 1250°C . Sin embargo, hay que tener en cuenta que la formación de fase α - Al_2O_3 en sustratos metálicos es muy complicada, ya que el sustrato y los *splats* deben permanecer durante la proyección por encima de la temperatura de nucleación de la fase α - Al_2O_3 (1300°C); y a esta temperatura en el sustrato metálico se generaría oxidación perjudicando la adherencia del

recubrimiento. Debido a esto, los investigadores Bolelli, Dubsky et al., han estudiado la mezcla de óxido de cromo con alúmina y encontraron que, a mayor cantidad de óxido de cromo, se genera una mayor estabilización de la fase α . Además, con la combinación de estos dos óxidos se forma una solución sólida la cual también aporta a la nucleación de la fase α -Al₂O₃ (Giovanni Bolelli et al., 2021; Dubsky et al., 2011). Dubsky et al., estudiaron el sistema Cr₂O₃-Al₂O₃ proyectado por plasma atmosférico (APS) con el fin de determinar el proceso de preparación de la materia prima que más aporta a la formación y estabilización de la fase α -Al₂O₃ (corindón). Los dos procesos elegidos fueron: mezclado mecánico de los polvos (óxido de cromo y alúmina) y polvos pre-aleados que consisten en soluciones sólidas entre ambos óxidos (Al, Cr)₂O₃. Los autores encontraron que en el proceso de plasma atmosférico (APS) se promueve la formación de esta fase α -Al₂O₃ cuando la materia prima Cr₂O₃-Al₂O₃ es pre-aleada (fundida), ya que se facilita la formación de solución sólida y esta a su vez promueve la estabilización de esta fase (corindón) (Dubsky, Chraska, Kolman, & Ridky, 2004). Por otro lado, al trabajar con materia prima mezclada mecánicamente, lo que se debe modificar para aumentar la fracción de la fase α -Al₂O₃ es la relación de los gases (Ar, H₂, N₂), esto con el fin de disminuir la velocidad de las partículas en el chorro y de este modo aumentar el tiempo de permanencia a una temperatura más alta, lo que permite mayor difusión de los óxidos para formar la solución sólida (Dubsky et al., 2011).

Años más tarde Stahr et al., demostraron que si el proceso de plasma atmosférico era estabilizado con agua (por sus siglas en inglés WSP), se podía llegar a trabajar tanto con materia prima mezclada mecánicamente como con polvos pre-aleados y así obtener altos niveles de fase α -Al₂O₃ (corindón) en el recubrimiento, mejorando de esta manera sus propiedades y capacidad protectora (Stahr et al., 2007). Por otra parte, Zamani et al., compararon la resistencia al desgaste de los recubrimientos elaborados por la mezcla del sistema Cr₂O₃-Al₂O₃ con los recubrimientos

individualmente proyectados de óxido de cromo y alúmina por plasma atmosférico¹³, sobre sustratos de acero al carbono tal como lo muestra la tabla 7. De su estudio concluyeron que los recubrimientos proyectados individualmente presentan mejores características microestructurales que los recubrimientos elaborados por los sistemas de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$. Esto se presenta por la falta de fusión de las partículas de óxido de cromo dentro del sistema $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, ya que usaron parámetros de manufactura en el cual la temperatura y tiempo de permanencia de las partículas dentro del plasma no eran los suficientes para fundir la mayor parte de partículas del óxido de cromo. Además, como se presenta en la tabla 7 a mayor contenido de óxido de cromo en los sistemas, menores son las características y propiedades respecto a los recubrimientos de los óxidos proyectados individualmente (Zamani & Valefi, 2017). Sin embargo, comparando la resistencia al desgaste entre los recubrimientos individuales y los sistemas $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, el sistema 50% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ fue el que presentó mayor resistencia a la propagación de grietas cuando es sometido a condiciones de desgaste, esto se debe a la cantidad de defectos microestructurales (porosidades y partículas no fundidas) presentes en el recubrimiento, los cuales muy posiblemente desviaron o detuvieron la propagación de las grietas. El sistema 75% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ a pesar de presentar mayor cantidad de defectos microestructurales, no tiene la más alta resistencia al desgaste ya que el alto contenido de óxido de cromo le da al recubrimiento mayor fragilidad, mientras que 50% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ da una combinación perfecta para retener y desviar las grietas. En algunos caso como este, la presencia de las fases eskolaíta y $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ combinada con los defectos microestructurales, brindan al recubrimiento mayor capacidad protectora frente a ambientes de desgaste en comparación con la presencia de las fases eskolaíta y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Dhakar et al., 2017; Rico et al., 2018; Yang et al., 2011; Zamani & Valefi, 2017).

¹³ Es importante aclarar que los recubrimientos elaborados por el sistema de óxidos fueron proyectados usando parámetros de manufactura de la alúmina, lo que implica menor temperatura en el plasma para las partículas.

Tabla 7

Características físicas, mecánicas y microestructurales de Cr_2O_3 , Al_2O_3 y $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ proyectados por plasma atmosférico.

Recubrimiento por APS	Porcentaje de porosidad	Microdureza ($\text{HV}_{0.3}$)	Rugosidad (μm)	Fuerza de adhesión (MPa)	Resistencia a la propagación de grietas ($\text{N/mm}^{1.5}$)	Fases Cristalográficas
Cr_2O_3	3.1	1380	2.05	51	6122	Eskolaita
Al_2O_3	3.7	1030	2.27	48.11	14044	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y un poco de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
75% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$	7.8	1170	3.02	25.91	13258	Eskolaita, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ y la solución solida ($\text{Al}_{0.9}\text{Cr}_{0.1}$) $_2\text{O}_3$
50% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$	6.5	1040	2.85	29.94	20412	Eskolaita y $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$
25% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$	5	818	2.68	43.97	17298	Eskolaita y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

Nota. Información tomada de “Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al_2O_3 , Cr_2O_3 and $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite coatings”, por P. Zamani et al., 2017, Surface and Coatings Technology.

En la tabla 8 se muestra una comparación entre el uso de parámetros de manufactura con diferentes valores para un sistema de proyección por plasma atmosférico, tomando como referencias los estudios realizados por Kai Yang y Bolelli et al., para recubrimientos elaborados por diferentes mezclas de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$. Los estudios presentados por Kai Yang et al., muestran que los sistemas $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ proyectados por plasma atmosférico con parámetros de manufactura altos, presentan porosidades más bajas con estructuras más densas y un mejoramiento en las propiedades mecánicas como: mayor microdureza y mayor tenacidad a la fractura. El mejoramiento de las propiedades también se da debido a que la materia prima usada por Kai Yang son polvos de Cr_2O_3 y Al_2O_3 con distribución de tamaño de partículas medio de $16.7\mu\text{m}$ y $17.5\mu\text{m}$ respectivamente, los cuales han sido pre-aleados, triturados y mezclados mecánicamente en diferentes proporciones. Mientras que Bolelli en su investigación usa parámetros de manufactura más bajos (ver tabla 8) y una materia prima de polvos ya mezclados mecánicamente del sistema

$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ con tamaño de partícula medio de $28.2\mu\text{m}$. Además, Kai yang en su sistema de proyección emplea una distancia de alimentación menor con mayores tasas de deposición que Bolelli, lo cual facilita la formación de fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (corindón), debido a que el enfriamiento del recubrimiento va a ser más lento porque la superficie del sustrato va a ganar temperatura debido a la cercanía del sistema de proyección. Los porcentajes de porosidad son 10 veces más bajos en los recubrimientos de Kai Yang que los de Bolelli (Giovanni Bolelli et al., 2021; Shao et al., 2015; Yang et al., 2011, 2013).

Tabla 8

Comparación del efecto de los parámetros de manufactura y propiedades mecánicas de los sistemas de recubrimiento $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ proyectado por plasma atmosférico.

Parámetros de manufactura y propiedades mecánicas	Kai Yang	Bolelli
Corriente de arco (A)	660	650
Gas primario del plasma Ar (slpm)	49	40
Gas secundario del plasma H_2 (slpm)	12	8
Tasa de alimentación del polvo (g/min)	35	18
Distancia de proyección (mm)	110	130
Tamaño medio de partícula para el Al_2O_3 (μm)	17.5	---
Tamaño medio de partícula para el Cr_2O_3 (μm)	16.7	---
Tamaño medio de partícula para $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (μm)	---	28.2
Sustrato metálico	Aleación de Al	Acero dulce Fe37
Preparación de la materia prima	Polvos de Cr_2O_3 y Al_2O_3 Triturados, mezclados y fusionados	Mezcla mecánica de Cr_2O_3 y Al_2O_3
Microdureza de la mezcla $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (MPa)	Para 70% Cr_2O_3 es de 12170 Para 90% Cr_2O_3 es de 14090	Para 84% Cr_2O_3 es de 12000

Nota. Información tomada de “Microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ composite coatings produced by atmospheric plasma spraying”, por k. Yang et al., 2011, Surface and Coatings Technology.

“Tribological properties of plasma sprayed Cr_2O_3 , $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ coatings”, por G. Bolelli et al., 2021.

6. Capacidad protectora de los recubrimientos de Cr_2O_3 y Al_2O_3 proyectados por la técnica de proyección térmica

6.1 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de alúmina

Lampke et al., compararon la capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de la alúmina cuando es proyectado por *Flame Spray* y por plasma atmosférico sobre sustratos de acero. En la resistencia al desgaste, el recubrimiento proyectado por plasma atmosférico presentó menor tasa de desgaste a comparación con el recubrimiento de alúmina proyectado por *Flame Spray*. Este comportamiento se presenta debido a que el recubrimiento proyectado por plasma atmosférico obtuvo mayor densidad, una alta cohesión entre *splats* y excelente estabilidad mecánica, lo que impidió que la superficie fuera desgastada con facilidad. En relación con la resistencia a la corrosión ambos recubrimientos presentaron potenciales de corrosión similares, esto quiere decir que ambos recubrimientos forman una película protectora al estar en contacto con la solución salina, lo cual hace lento el proceso de difusión del agente corrosivo hasta zonas cercanas al sustrato. En la tabla 9 se muestran los resultados de corrosión y desgaste obtenidos en los ensayos y pruebas realizadas en el estudio mencionado (Lampke et al., 2010, 2011; Psyllaki et al., 2001).

Tabla 9

Comparación de la capacidad protectora de la alúmina proyectado por Flame Spray y plasma sobre un sustrato de acero.

Técnica de proyección	Fases de alúmina	Tasas de desgaste (mg/min)	Potencial de corrosión (Ecorr)	Microdureza HV0.1(MPa)
Flame Spray	Principalmente $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ seguida de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	497	Similares	10346
APS	Principalmente $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ seguida de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	48		12111

Nota. Información tomada de “Alumina coatings obtained by thermal spraying and plasma anodizing-A comparison”, por T. Lampke et al., 2011, Surface and Coatings Technology. “Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods”, por T. Lampke et al., 2010, Materials Science.

Bolelli et al., compararon la resistencia al desgaste y a la corrosión de los recubrimientos de polvos de alúmina nanométricos en suspensión proyectados por llama de alta velocidad (HVSFS) comparados con polvos micrométricos proyectados por plasma atmosférico (APS) y llama de alta velocidad (HVOF) sobre placas de titanio. Los autores encontraron que el recubrimiento de alúmina elaborado por HVSFS, presenta mayor resistencia al desgaste por deslizamiento que los otros procesos ya que su microestructura está formada casi completamente por partículas fundidas y delgadas laminillas, las cuales no permiten la formación de defectos interlaminares ni desarrollan microfisuras, a diferencia de los procesos HVOF y APS que no tienen la misma cantidad de partículas fundidas en el recubrimiento. En los procesos de APS y HVOF convencional (polveros micrométricos) la superficie no forma una capa protectora y su mecanismo de desgaste es por fractura frágil, generando mayor desgaste. Por otro lado, el proceso de HVSFS forma una tribofilm¹⁴ a causa de la deformabilidad plásticas de las laminillas de la estructura durante la proyección. Para la resistencia a la corrosión el recubrimiento proyectado por el sistema de proyección de HVSFS presentó mayor resistencia, debido a sus excelentes características microestructurales, las cuales obstaculizan la conducción eléctrica del electrolito y limitan la posibilidad de corrosión electroquímica del sustrato (G. Bolelli et al., 2010; Giovanni Bolelli et al., 2008). En la tabla 10 se muestran algunas de las características microestructurales, fases cristalográficas, valores de las tasas de desgaste y corrosión para los tres sistemas de proyección del estudio.

¹⁴ Tribofilm: Película superficial delgada generada por deformación de los splats presentes en la estructura del recubrimiento.

Tabla 10

Características microestructurales, valores de las tasas de desgaste y corrosión para los tres sistemas de proyección usando alúmina como materia prima.

Características	APS	HVOF	HVSFS
Tamaño de partículas de alúmina	Micrométricas	Micrométricas	Nanométricas en suspensión
Porcentaje de porosidad	11	8.6	4.4
Tamaño promedio de los poros (μm^2)	1.58	1.71	0.71
Resistencia de los poros del recubrimiento (Ω)	2417	2222	10340
Tasa de desgaste del recubrimiento ($\text{mm}^3/(\text{Nm})$)	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$

Nota. Información tomada de “Microstructural and Tribological Investigation of High-Velocity Suspension Flame Sprayed (HVSFS) Al_2O_3 Coatings”, por G. Bolelli et al., 2008, Journal of Thermal Spray Technology.

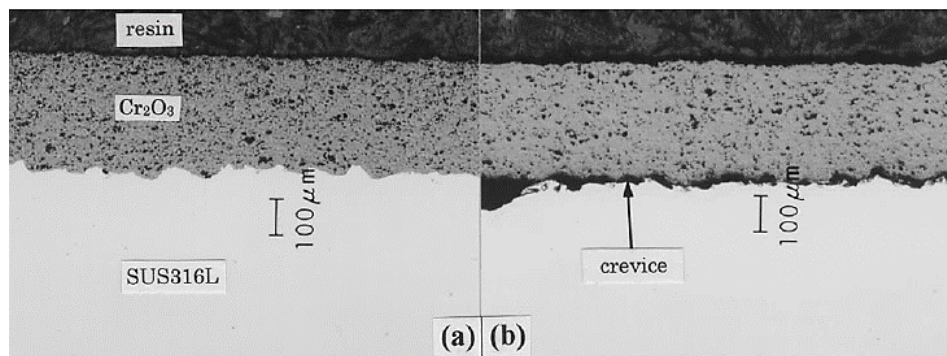
6.2 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de óxido de cromo

En el 2017 Laura Dimate et al., evaluaron la capacidad protectora del óxido de cromo en ambientes corrosivos y concluyeron que los defectos del recubrimiento como: grietas, poros y partículas no fundidas y/o semifundidas pueden favorecer su pasivación parcial, debido a que los defectos sufren un taponamiento por el electrolito y los productos de corrosión, lo cual disminuye la conducción iónica y pasiva el recubrimiento con el paso del tiempo (Dimate Castellanos et al., 2017). Lo mencionado por Laura Dimate es refutado por los resultados presentados en el estudio de Monticelli et al., los cuales estudiaron el comportamiento de corrosión del óxido de cromo con capa base de Ni20%Cr proyectado por plasma atmosférico sobre un acero AISI-SAE 1040. Para la evaluación de la corrosión la muestra recubierta fue expuesta a contacto eléctrico con solución acuosa de 3.5%NaCl por 3 días. En el estudio concluyen que el recubrimiento de óxido de cromo tiene una gran porosidad alrededor del 7.5%, lo que permitió el paso del agente corrosivo hasta las inmediaciones del sustrato. Una de las posibles razones por las que el agente corrosivo alcanzó el sustrato fue porque era porosidad de tipo interconectada, la cual facilitó la difusión del electrolito en el recubrimiento (Monticelli et al., 2011). Por otra parte, Li et al., lograron depositar óxido de cromo sobre un sustrato de acero inoxidable 316L a través de la técnica de plasma atmosférico

(APS), con el fin de estudiar si la proyección de estas partículas aumentaba la capacidad protectora que ya tiene el sustrato. Tras realizar la prueba de corrosión observaron que el óxido de cromo aumenta la resistencia a la corrosión del acero 316L. En la figura 7b se observa la interfaz recubrimiento-sustrato y productos de corrosión debido a corrosión por rendijas (crevice corrosion), la cual fue generada por la interconexión de los defectos del recubrimiento como poros (porcentaje porosidad entre 10-14%) o grietas (Dimaté Castllanos, 2011; C. L. Li, Zhao, Matsumura, et al., 2001). En el mismo año Li et al., mejoraron la resistencia a la corrosión de este óxido, añadiendo al proceso una capa base de NiCr y realizando un tratamiento de sellado¹⁵ al recubrimiento con resina. El sellador fue una mezcla de polimetilsilicio y vinilmethylsilicio, esta resina se introdujo en las porosidades del recubrimiento y generó una disminución en el porcentaje de porosidad, debido a la formación de una capa compacta (sin poros) que impidió el paso del agente corrosivo hasta el sustrato. La capa base no aumentó la resistencia a la corrosión del recubrimiento como si lo hizo el tratamiento de sellado (C. L. Li, Zhao, Takahashi, et al., 2001).

Figura 7

Sección transversal de la muestra recubierta por óxido de cromo: a) Antes del proceso de corrosión; b) Después del proceso de corrosión.



Nota. Figura tomada de “The effect of NiCr intermediate layer on corrosion behavior of Cr₂O₃ ceramic coated materials” (p. 55), por C. Li et al., 2001, Surface and Coatings Technology. Crevice: rendija, Resin: resina.

¹⁵ Los tratamientos de sellados son un método tradicional para rellenar poros de materiales y protegerlos contra la corrosión.

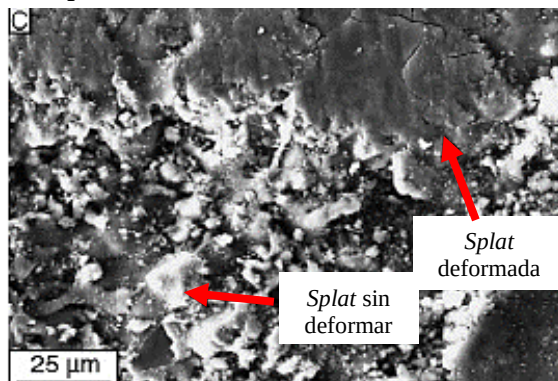
Los investigadores Sreenivasa et al., estudiaron el comportamiento y resistencia a la corrosión del recubrimiento de óxido de cromo vs acero inoxidable martensítico de grado AISI 410, donde las partículas del Cr_2O_3 fueron proyectadas sobre una capa base de Ni/Cr, encargada de mejorar la adhesión recubrimiento-sustrato. El método que seleccionaron para evaluar la resistencia a la corrosión fue niebla salina con solución salina de 5% NaCl. Los resultados mostraron que el recubrimiento de óxido de cromo formó una capa pasiva, la cual evitó que la superficie del acero sufriera corrosión por picado, a diferencia del acero inoxidable martensítico que sí presentó este tipo de corrosión localizada para los mismos tiempos de exposición (50, 100, 150, 200 horas). La capa base de Ni/Cr proyectada sobre el sustrato, además de brindar adhesión al recubrimiento, también le proporcionó buena resistencia a la corrosión. El recubrimiento de Cr_2O_3 presentó algunos poros interconectados lo cual permitió que el agente corrosivo avanzara con mayor facilidad hasta inmediaciones de la capa base-sustrato (Sreenivasa Rao et al., 2017).

En términos de resistencia al desgaste, el óxido de cromo presenta mayor resistencia al desgaste por deslizamiento que la alúmina (cuando es proyectado por llama de alta velocidad HVOF) según la investigación realizada por Giovanni Bolelli et al. Dichos autores encontraron la formación de una película compacta y suave (lisa) que protege la superficie de daños tales como lo muestra la figura 8. Por otro lado, la alta microdureza del recubrimiento (óxido de cromo) implica que, una vez formada la capa compacta, ésta no podrá ser arada tan fácilmente por el disco o los residuos sueltos. Esa capa compacta consiste en *splats* deformados plásticamente. Los investigadores concluyen que el desgaste superficial del recubrimiento de óxido de cromo es suave o ultra suave, siempre y cuando se forme la capa compacta por deformación de los *splats*, mientras que para la alúmina este tipo de desgaste por deslizamiento genera que las laminillas de la estructura presenten delaminación y que se desgaste con mayor facilidad a medida que pasa el

tiempo (G. Bolelli, Lusvarghi, Manfredini, Mantini, et al., 2007; G. Bolelli, Lusvarghi, Manfredini, Pighetti Mantini, et al., 2007; Giovanni Bolelli et al., 2006, 2021).

Figura 8

Detalles de las cicatrices de desgaste en el óxido de cromo Cr_2O_3 proyectado con llama de alta velocidad después de la prueba pin on disk.



Nota. Figura tomada de “Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings” (p. 1306), por G. Bolelli et al., 2006, Wear.

6.3 Capacidad protectora al desgaste y a la corrosión de recubrimientos de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$

Soo Haeng et al., realizaron estudios de corrosión en caliente¹⁶ con sales de litio (Karlsson & Evans, 2001) al sistema 50% $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Rapp, 2002) proyectado por plasma atmosférico sobre la superficie de una superaleación de IN713LC¹⁷, con capa base NiCrAlY aluminizada¹⁸ vs la superaleación IN713LC. Tras finalizar la prueba de corrosión, la superaleación presentó mayor pérdida de masa y oxidación interna que la muestra con recubrimiento, debido a que la superficie de la superaleación en estas condiciones de corrosión forma una débil y frágil cascarilla, la cual se fragmenta y permite la pérdida de masa a medida que pasa el tiempo. Por otro lado, el recubrimiento con sus excelentes características anticorrosivas generó una barrera térmica (capa pasiva) compacta, la cual le brindó mayor estabilidad térmica en el sistema de sales fundidas de

¹⁶ Es la reducción electrolítica de la sal de cloruro de litio $\text{LiCl-3\%Li}_2\text{O}$ a 300°C durante 3 horas en una atmósfera de argón.

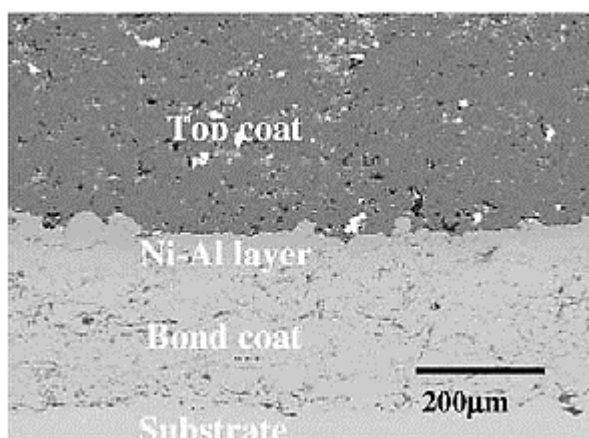
¹⁷ Composición química del IN713LC: Ni:74%, Cr:11.57%, Mo:4.15%, Al:6.05%; Ti:0.76%, Nb:1.95%; Fe:0.10%, Si:0.02%, C:0.05% y Co:0.08% en peso.

¹⁸ Los polvos para la aluminización son mezcla de: 2%Al, 3%Cr, 94.9% Al_2O_3 y 0.1% NH_4F y se aluminiza con el fin de aumentar el porcentaje de Al en la interfase recubrimiento-capas base. El espesor de esta capa está entre 30-50 μm .

litio caliente. Además, la capa aluminizada y capa base también contribuyeron a aumentar la resistencia a la corrosión en caliente del recubrimiento. En la interfaz recubrimiento-capa aluminizada se presentó formación de solución sólida $\text{LiAl}(\text{Cr})\text{O}_2$, la cual se generó por la reacción química entre la solución sólida del $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ y Li_2O , siendo dicha solución sólida ($\text{LiAl}(\text{Cr})\text{O}_2$) la que retardo la difusión interna de iones de oxígeno (Cho et al., 2010). En la figura 9 se presenta la sección transversal del recubrimiento con sus respectivas capas intermedias.

Figura 9

Sección transversal del recubrimiento $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, capa aluminizada, capa base y sustrato proyectado por plasma atmosférico.



Nota. Figura tomada de “Corrosion behavior of plasma-sprayed $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ coatings in hot lithium molten salt” (p-215), por S. Cho et al., 2010, Journal of Nuclear Materials. Top coat: Capa superior de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, Ni-Al layer: Capa de Ni-Al, Bond coat: Capa base o de unión, Substrate: Sustrato.

Fang Shao et al., evaluaron el rendimiento anticorrosivo del recubrimiento de $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ al cual se le aplicó un sellador inorgánico¹⁹ y posteriormente se le realizó un tratamiento térmico para mejorar su capacidad protectora y sus características microestructurales respectivamente. Dicho recubrimiento fue elaborado con capa base (Ni-Cr) y depositado sobre un acero inoxidable 304 por plasma atmosférico. El sellador inorgánico elegido fue fosfato de aluminio con una

¹⁹El fosfato de aluminio se preparó a partir de una solución de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) y ácido ortofosfórico H_3PO_4 , las muestras se introducen en esta solución por 30 min a 50°C, luego se dejan secar a tem_{amb} y presión atmosférica durante 12 horas.

pequeña fracción partículas nanométricas de Al_2O_3 . Estudios anteriores realizados por Ahmaniemi, Vippola et al., demostraron que este sellador conduce a una disminución de poros y aumenta la resistencia al desgaste y a la corrosión al ser usado con recubrimientos de Cr_2O_3 y Al_2O_3 (Ahmaniemi et al., 2002; Berard et al., 2008; Vippola et al., 2001). Los ensayos de corrosión consistieron en curvas de polarización potenciodinámicas y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Como resultado del ensayo de curvas de polarización, se observó como el sellador inorgánico al estar presente en el recubrimiento disminuye la densidad de corriente en casi 10 veces respecto al recubrimiento sin sellador. Los datos de EIS muestra que el recubrimiento con sellador presenta mayor resistencia al flujo de corriente a través de los poros, lo que aumenta la resistencia a la corrosión ya que no hay difusión de la solución de NaCl por la baja cantidad de poros en el recubrimiento. El tratamiento térmico densificó la estructura del recubrimiento pero no afectó significativamente la resistencia a corrosión del recubrimiento (Babu et al., 2018; Shao et al., 2015).

7. Conclusiones

Tomando en cuenta cada una de las investigaciones revisadas y plasmadas en este estado del arte, el cual se basó en el estudio de la capacidad protectora de los recubrimientos de Cr_2O_3 - Al_2O_3 elaborados por proyección térmica en componentes metálicos permite concluir que:

Se identificó el proceso de llama de baja velocidad (*Flame Spray*), llama de alta velocidad (HVOF) y plasma atmosférico (APS) como los procesos más utilizados en la elaboración de recubrimientos de Cr_2O_3 , Al_2O_3 y Cr_2O_3 - Al_2O_3 sobre un sustrato metálico. El proceso de plasma atmosférico gracias a sus elevadas temperaturas permite la proyección de partículas de ambos óxidos sin mayor dificultad, elaborando recubrimientos tanto para la alúmina como para el óxido de cromo con excelentes características microestructurales respecto a otros procesos de la técnica. Por otro lado, el proceso de *Flame Spray* a pesar de no generar la energía térmica del proceso APS,

permite elaborar recubrimientos con buenas características microestructurales para el caso de la alúmina, mientras que para el óxido de cromo debido a su alto punto de fusión puede llegar a presentar características microestructurales que no favorecen la capacidad protectora del recubrimiento. El proceso de HVOF debido a su alta energía cinética permite elaborar recubrimientos para los dos óxidos con características microestructurales similares o superiores al proceso APS.

Por otra parte, se analizó la influencia de los parámetros de manufactura en la microestructura de los recubrimientos de Al_2O_3 y Cr_2O_3 . Los parámetros con más influencia en el cambio de microestructura de los recubrimientos de alúmina y el óxido de cromo elaborados por plasma atmosférico fueron: la distancia de proyección y la temperatura del sustrato, la preparación y forma de la materia; ya que la variación de dichos parámetros puede favorecer o limitar la estabilización de la fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ la cual brinda al recubrimiento excelentes propiedades físico-mecánicas. Para el recubrimiento del sistema $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, el óxido de cromo y la materia prima pre-aleada ayudan a estabilizar la fase α de la alúmina para el proceso de plasma atmosférico y con esto se evita someter al sustrato metálico a un tratamiento térmico o mantenerlo a altas temperaturas durante la proyección de las partículas. Para los procesos *Flame Spray* y HVOF los parámetros de manufactura que más afectan las características microestructurales de un recubrimiento son la relación de gases y la energía cinética de las partículas respectivamente.

Adicionalmente, se comparó la capacidad protectora a la corrosión y al desgaste de los recubrimientos de Al_2O_3 y Cr_2O_3 elaborados bajo procesos de la técnica de proyección térmica en sustratos metálicos. Los recubrimientos proyectados por *Flame Spray*, HVOF y plasma atmosférico de alúmina presenta mayor resistencia a la corrosión que los de óxido de cromo, esto porque los recubrimientos de alúmina presentan mejores características microestructurales por lo

cual evitan la difusión del agente corrosivo hasta inmediaciones de la interfase recubrimiento-sustrato. No obstante, la resistencia a la corrosión de los recubrimiento de óxido de cromo puede ser mejorada con la adición de sellantes inorgánicos, los cuales permiten disminuir la porosidad dificultando la difusión del electrolito en el recubrimiento. En la resistencia al desgaste, los recubrimientos de óxido de cromo elaborados por los tres procesos presentaron menores tasa de desgaste por deslizamiento que la alúmina, debido a que los recubrimientos elaborados con partículas de óxido de cromo forman una capa suave y compacta de laminillas deformadas, las cuales evitan su fácil desgaste. Mientras que los recubrimientos de alúmina al estar en condiciones de desgaste tienden a sufrir un desgaste por delaminación de la estructura laminar del recubrimiento.

Referencias bibliográficas

Aghasibeig, M., Tarasi, F., Lima, R. S., Dolatabadi, A., & Moreau, C. (2019). Una revisión sobre la evolución patentada de la tecnología de suspensión en proyección térmica. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(7), 1579–1605. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00904-x>

Ahmaniemi, S., Vippola, M., Vuoristo, P., Mäntylä, T., Buchmann, M., & Gadow, R. (2002). Residual stresses in aluminium phosphate sealed plasma sprayed oxide coatings and their effect on abrasive wear. *Wear*, 252(7–8), 614–623. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00020-0)

Akhtari Zavareh, M., Mohammed Sarhan, A. A. D., Akhtari Zavareh, P., & Basirun, W. J. (2016). Electrochemical corrosion behavior of carbon steel pipes coated with a protective ceramic layer using plasma and HVOF thermal spray techniques for oil and gas. *Ceramics International*, 42(2), 3397–3406. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.134>

An, Y., Li, S., Hou, G., Zhao, X., Zhou, H., & Chen, J. (2017). Mechanical and tribological properties of nano/micro composite alumina coatings fabricated by atmospheric plasma spraying. *Ceramics International*, 43(6), 5319–5328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.072>

Aruna, S. T., Balaji, N., Shedthi, J., & Grips, V. K. W. (2012). Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings. *Surface and Coatings Technology*, 208, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.016>

Babu, P. S., Sen, D., Jyothirmayi, A., Krishna, L. R., & Rao, D. S. (2018). Influence of microstructure on the wear and corrosion behavior of detonation sprayed Cr₂O₃-Al₂O₃ and

plasma sprayed Cr₂O₃ coatings. *Ceramics International*, 44(2), 2351–2357.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.203>

Berard, G., Brun, P., Lacombe, J., Montavon, G., Denoirjean, A., & Antou, G. (2008). Influence of a sealing treatment on the behavior of plasma-sprayed alumina coatings operating in extreme environments. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(3), 410–419.
<https://doi.org/10.1007/s11666-008-9184-2>

Bolelli, G., Bonferroni, B., Cannillo, V., Gadow, R., Killinger, A., Lusvarghi, L., Rauch, J., & Stiegler, N. (2010). Wear behaviour of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS) Al₂O₃ coatings produced using micron- and nano-sized powder suspensions. *Surface and Coatings Technology*, 204(16–17), 2657–2668. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.02.018>

Bolelli, G., Lusvarghi, L., Manfredini, T., Mantini, F. P., Polini, R., Turunen, E., Varis, T., Hannula, S. P., & Hannula, S. P. (2007). Comparison between plasma- and HVOF-sprayed ceramic coatings. Part I: microstructure and mechanical properties. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 1(1), 38–61. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2007.013620>

Bolelli, G., Lusvarghi, L., Manfredini, T., Pighetti Mantini, F., Turunen, E., Varis, T., Hannula, S. P., & Hannula, S. P. (2007). Comparison between plasma- and HVOF-sprayed ceramic coatings. Part II: tribological behaviour. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 1(1), 62–79. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2007.013621>

Bolelli, Giovanni, Cannillo, V., Lusvarghi, L., & Manfredini, T. (2006). Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings. *Wear*, 261(11–12), 1298–1315.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.023>

Bolelli, Giovanni, Rauch, J., Cannillo, V., Killinger, A., Lusvarghi, L., & Gadow, R. (2008). Microstructural and tribological investigation of high-velocity suspension flame sprayed (HVSFS) Al_2O_3 coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(1), 35–49. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9279-9>

Bolelli, Giovanni, Steduto, D., Kiilakoski, J., Varis, T., Lusvarghi, L., & Vuoristo, P. (2021). Tribological properties of plasma sprayed Cr_2O_3 , $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ coatings. 481(May), 1–18.

Cedelle, J., Vardelle, M., & Fauchais, P. (2006). Influence of stainless steel substrate preheating on surface topography and on millimeter- and micrometer-sized splat formation. *Surface and Coatings Technology*, 201(3–4), 1373–1382. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.003>

Cellard, A., Garnier, V., Fantozzi, G., Baret, G., & Fort, P. (2009). Wear resistance of chromium oxide nanostructured coatings. *Ceramics International*, 35(2), 913–916. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.02.022>

Cellard, Audrey, Zenati, R., Garnier, V., Fantozzi, G., & Baret, G. (2007). Optimization of chromium oxide nanopowders dispersion for spray-drying. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2–3), 1017–1021. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.132>

Cervera González, I. (2011). *Desarrollo y optimización de recubrimientos de superaleaciones con adición de cargas cerámicas y elementos reactivos obtenidos por proyección térmica para aplicaciones de resistencia a oxidación a alta temperatura y al desgaste.*

Cho, S. H., Park, S. Bin, Kang, D. S., Jeong, M. S., Park, H., Hur, J. M., & Lee, H. S. (2010). Corrosion behavior of plasma-sprayed Al₂O₃-Cr₂O₃ coatings in hot lithium molten salt. *Journal of Nuclear Materials*, 399(2–3), 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.01.022>

Coating, A., & Chemical, A. (2004). Introduction to Thermal Spray Technology and Surface Engineering Introduction to Thermal Spray Technology. *ASM International*. www.Knovel.com

Darut, G. (2010). *Elaboration de revêtements à structure sub-micrométrique pour applications tribologiques par projection plasma de suspensions*.

Dhakar, B., Chatterjee, S., & Sabiruddin, K. (2017). Influence of process parameters on the formation of phases and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃-Cr₂O₃ coatings. *Materials Research Innovations*, 21(6), 367–376. <https://doi.org/10.1080/14328917.2016.1265246>

Dhiman, R., McDonald, A. G., & Chandra, S. (2007). Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface and Coatings Technology*, 201(18), 7789–7801. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.03.010>

Dimate Castellanos, L. M., Olaya Flórez, J. J., & Alfonso Orjuela, J. E. (2017). Resistencia a la corrosión de recubrimientos de Cr₂O₃ medida mediante EIE. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 17–37. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8941>

Dimaté Castllanos, L. M. (2011). *Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama*.

Dong, S., Song, B., Hansz, B., Liao, H., & Coddet, C. (2013a). Improvement in the microstructure and property of plasma sprayed metallic, alloy and ceramic coatings by pre-/during-treatment of dry-ice blasting. *Surface and Coatings Technology*, 220, 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.071>

Dong, S., Song, B., Hansz, B., Liao, H., & Coddet, C. (2013b). Microestructura y propiedades del recubrimiento de Cr₂O₃ depositado por poyeccion por plasma y dry-ice blasting. *Surface and Coatings Technology*, 225, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.016>

Dubsky, J., Chraska, P., Kolman, B., Stahr, C. C., & Berger, L. M. (2011). Phase formation control in plasma sprayed alumina-chromia coatings. *Ceramics - Silikaty*, 55(3), 294–300.

Erickson, L. C., Hawthorne, H. M., & Troczynski, T. (2001). Correlations between microstructural parameters, micromechanical properties and wear resistance of plasma sprayed ceramic coatings. *Wear*, 250(1–12), 569–575. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00608-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00608-1)

Ferrer, M., Moreno, M., & Vargas, F. (2019). Definición y usos de la proyección térmica. In UPTC (Ed.), *Recubrimientos de circonia y alúmina por proyección térmica con llama: parámetros para obtener recubrimientos de alto punto de fusión* (UPTC, pp. 27–57). UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. <https://uptc.metalibros.org/index.php/editorial-uptc/catalog/book/14>

Ferrer, M., Moreno, M., Vargas, F., Peña, G., Vera, E., & Pineda, Y. (2013). Depósito y caracterización de recubrimientos cerámicos de Al₂O₃ sobre acerp 1020 por termorrociado. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 317–322.

Fischer, T. E., Qiao, Y., Liu, Y. R., Paper, T. W., International, A. S. M., Spray, T., xyx, Sulzer Metco, Rodriguez, S., Coating, A., Chemical, A., Abello Linde, José, I., Morales, A., John, I., Olaya, J., Héctor, I., Rojas, F., & Zavareh, M A. Sarhan, A A D M. Zavareh, P A. Razak, B A. Kakooei, S. (2012). Introduction to Thermal Spray Technology and Surface Engineering Introduction to Thermal Spray Technology. *Thermal Sprayed Coatings and Their Tribological Performances*, 5(January 2018), 1–5. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-7489-9.ch001>

Fukanuma, H., Huang, R., Tanaka, Y., & Uesugi, Y. (2009). Mathematical modeling and numerical simulation of splat cooling in plasma spray coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5–6), 965–974. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9366-6>

Gao, Y., Xu, X., Yan, Z., & Xin, G. (2002). High hardness alumina coatings prepared by low power plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 154(2–3), 189–193. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01711-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01711-X)

Gell, M., Jordan, E. H., Sohn, Y. H., Goberman, D., Shaw, L., & Xiao, T. D. (2001). Development-and-implementation-of-plasma-sprayed-nanostructured-ceramic-coatings_2001_Surface-and-Coatings-Technology.pdf. *Surface and Coatings Technology*, 147, 48–54.

Hardwicke, C. U., & Lau, Y. C. (2013). Advances in thermal spray coatings for gas turbines and energy generation: A review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(5), 564–576. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9904-0>

Hincapie Campos, W. S. (2013). *RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECUBRIMIENTOS PRODUCIDOS CON EL SISTEMA DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR*

LLAMA Ing . Williams Steve Hincapie Campos RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECUBRIMIENTOS. Universidad Nacional de Colombia.

Huang, J., Liu, Y., Yuan, J., & Li, H. (2014). Al/Al₂O₃ composite coating deposited by flame spraying for marine applications: Alumina skeleton enhances anti-corrosion and wear performances. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(4), 676–683.
<https://doi.org/10.1007/s11666-014-0056-7>

International, A. (2014). Documento técnico sobre Tecnología de Termo-pulverizado Preparado por la Thermal Spray Society. *ASM International, Figura 1*, 1–8.

International, A., & Associates, J. R. D. &. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology* (J. R. Davis (ed.)).

Iwaszko, J. (2006). Surface remelting treatment of plasma-sprayed Al₂O₃ + 13 wt.% TiO₂ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3443–3451.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.234>

Kafkaslıoğlu Yıldız, B., Yılmaz, H., & Tür, Y. K. (2019). Evaluation of mechanical properties of Al₂O₃–Cr₂O₃ ceramic system prepared in different Cr₂O₃ ratios for ceramic armour components. *Ceramics International*, 45(16), 20575–20582.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.037>

Karlsson, A. M., & Evans, A. G. (2001). A numerical model for the cyclic instability of thermally grown oxides in thermal barrier systems. *Acta Materialia*, 49(10), 1793–1804.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00073-8)

Kiilakoski, J., Trache, R., Björklund, S., Joshi, S., & Vuoristo, P. (2019). Process Parameter Impact on Suspension-HVOF-Sprayed Cr₂O₃ Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(8), 1933–1944. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00940-7>

Klyastkina, E. (2012). *Desarrollo y caracterización de recubrimientos cerámicos nanoestructurados obtenidos mediante proyección por plasma atmosférico*. 236.

Lampke, T., Meyer, D., Alisch, G., Nickel, D., Scharf, I., Wagner, L., & Raab, U. (2011). Alumina coatings obtained by thermal spraying and plasma anodising - A comparison. *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 2012–2016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.006>

Lampke, T., Meyer, D., Alisch, G., Wielage, B., Pokhmurska, H., Klapkiv, M., & Student, M. (2010). Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods. *Materials Science*, 46(5), 591–598. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9328-2>

Li, C. L., Zhao, H. X., Matsumura, M., Takahashi, T., Asahara, M., & Yamaguchi, H. (2001). The effect of NiCr intermediate layer on corrosion behavior of Cr₂O₃ ceramic coated materials. *Surface and Coatings Technology*, 124(1), 53–60. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00531-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00531-9)

Li, C. L., Zhao, H. X., Takahashi, T., & Matsumura, M. (2001). Improvement of corrosion resistance of materials coated with a Cr₂O₂/NiCr dilayer using a sealing treatment. *Materials Science and Engineering A*, 308(1–2), 268–276. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01976-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01976-6)

Li, J. F., Liao, H., Wang, X. Y., Normand, B., Ji, V., Ding, C. X., & Coddet, C. (2004). Improvement in wear resistance of plasma sprayed yttria stabilized zirconia coating using

nanostructured powder. *Tribology International*, 37(1), 77–84. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(03)00138-5)

Lima, R. S., & Marple, B. R. (2007). Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: A review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(1), 40–63. <https://doi.org/10.1007/s11666-006-9010-7>

Michalak, M., Latka, L., Sokolowski, P., Toma, F. L., Myalska, H., Denoirjean, A., & Ageorges, H. (2020). Microstructural, mechanical and tribological properties of finely grained Al₂O₃ coatings obtained by SPS and S-HVOF methods. *Surface and Coatings Technology*, 404(July), 126463. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126463>

Misra, V. C., Chakravarthy, Y., Khare, N., Singh, K., & Ghorui, S. (2020). Strongly adherent Al₂O₃ coating on SS 316L: Optimization of plasma spray parameters and investigation of unique wear resistance behaviour under air and nitrogen environment. *Ceramics International*, 46(7), 8658–8668. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.099>

Monticelli, C., Balbo, A., & Zucchi, F. (2011). Corrosion and tribocorrosion behaviour of thermally sprayed ceramic coatings on steel. *Surface and Coatings Technology*, 205(12), 3683–3691. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.023>

Morales Torres, J., Olaya Flores, J. J., & Rojas Molano, H. F. (2012). Una aproximación a la tecnología de proyección térmica. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 9(2), 60–71.

Nandiyanto, A. B. D., & Okuyama, K. (2011). Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to

submicrometer size ranges. *Advanced Powder Technology*, 22(1), 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2010.09.011>

National, T., & Manual, T. S. (2001). *El programa nacional de investigación sobre la construcción naval*.

Núñez Celis, H. D. (2020). *Evaluación de la microestructura y la capacidad protectora de recubrimientos de Cr₂O₃ depositados mediante proyección térmica por llama en un acero AISI-SAE 1020*. Universidad Industrial de Santander.

Paper, T. W., International, A. S. M., & Spray, T. (2012a). Key Research Challenges in Thermal Spray Science and Technologies. *Addendum: Thermal*, 1–10.

Paper, T. W., International, A. S. M., & Spray, T. (2012b). ThermalSprayMethods
Flamespray. *Addendum: Thermal*.
https://www.asminternational.org/documents/17679604/17892455/Addendum+1_Thermal+Spray+Methods.pdf/34b1cf33-98b2-475c-af6b-cfb0d4cc77bc

Perez Remesal, S. F., & Renedo Estebanez, C. (2019). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. *Ingeniería Eléctrica*, 1.0(08), 6–19.
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1307/course/section/1605/T06.pdf>

Pinzón, A. V., Urrego, K. J., González-Hernández, A., Rincón Ortiz, M., & Vargas Galvis, F. (2018). Corrosion protection of carbon steel by alumina-titania ceramic coatings used for industrial applications. *Ceramics International*, 44(17), 21765–21773.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.273>

Psyllaki, P. P., Jeandin, M., & Pantelis, D. I. (2001). Microstructure and wear mechanisms of thermal-sprayed alumina coatings. *Materials Letters*, 47(1–2), 77–82. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00215-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00215-9)

Rapp, R. A. (2002). Hot corrosion of materials: A fluxing mechanism? *Corrosion Science*, 44(2), 209–221. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00057-9)

Restrepo, E., Vargas, F., López, M., Cardona, R., & Duarte, G. (2012). Elaboración de recubrimientos cerámicos mediante proyección térmica por combustión a partir de residuos sólidos industriales Elaboration of ceramic coatings by flame spraying process from industrial solid waste. *Revista Materia*, 17 (4), 1176–1185.

Rico, A., Salazar, A., Escobar, M. E., Rodriguez, J., & Poza, P. (2018). Optimization of atmospheric low-power plasma spraying process parameters of Al₂O₃-50wt%Cr₂O₃ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 354(April), 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.032>

S.A., A. L. (2007). *Proyección Térmica de Superficies*. https://www.linde-gas.es/es/images/LINSPRAY_proyección_térmica_de_superficies_13049-0207_tcm316-60209.PDF

Sabiruddin, K., Joardar, J., & Bandyopadhyay, P. P. (2010). Analysis of phase transformation in plasma sprayed alumina coatings using Rietveld refinement. *Surface and Coatings Technology*, 204(20), 3248–3253. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.026>

Sarikaya, O. (2005). Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 190(2–3), 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.007>

Shahien, M., & Suzuki, M. (2017). Low power consumption suspension plasma spray system for ceramic coating deposition. *Surface and Coatings Technology*, 318, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.040>

Shao, F., Yang, K., Zhao, H., Liu, C., Wang, L., & Tao, S. (2015). Effects of inorganic sealant and brief heat treatments on corrosion behavior of plasma sprayed Cr₂O₃-Al₂O₃ composite ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 276, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.045>

Sreenivasa Rao, K. V., Girisha, K. G., Anjan, S., & Abhilash Sharma, N. (2017). Experimental Investigation of Corrosion Behavior of Plasma Sprayed Cr₂O₃ Coatings on 410 grade Steel. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 10254–10258. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.359>

Stahr, C. C., Saaro, S., Berger, L. M., Dubský, J., Neufuss, K., & Herrmann, M. (2007). Dependence of the stabilization of α -Alumina on the spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(5–6), 822–830. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9107-7>

Sulzer Metco. (2016). *An Introduction to Thermal Spray*. 6, 24.

Superior, E., Industriales, S., Bell, J., & Pastor, C. V. (2016). *Desarrollo y optimización de recubrimientos de aleación MCrAlY con dispersión de cargas cerámicas obtenidos por proyección térmica sostenible para aplicaciones de resistencia a oxidación a altas temperaturas*. (Issue 1983, pp. 1–14).

Vasudev, H., Thakur, L., Singh, H., & Bansal, A. (2020a). A study on processing and hot corrosion behaviour of HVOF sprayed Inconel718-nano Al₂O₃ coatings. *Materials Today Communications*, 25(August), 101626. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101626>

Vasudev, H., Thakur, L., Singh, H., & Bansal, A. (2020b). An investigation on oxidation behaviour of high velocity oxy-fuel sprayed Inconel718-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 393(March), 125770. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125770>

Vippola, M., Ahmaniemi, S., Vuoristo, P., Lepistö, T., & Mäntylä, T. (2001). Microstructural Study of Plasma Sprayed Chromium Oxide Coatings: Effect of Aluminum Phosphate Sealing. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 11(June), 607–612.

Wank, A. (2010). *Basics of Thermal Spray Technology I Processes*. 20. http://www.gtv-mbh.com/_old/gtv-mbh-englisch/www.gtv-mbh.de/cms/upload/publikat/Wank/thermal_spray_basics_processes.pdf

Yang, K., Zhou, X., Liu, C., Tao, S., & Ding, C. (2013). Sliding wear performance of plasma-sprayed Al₂O₃-Cr₂O₃ composite coatings against graphite under severe conditions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(7), 1154–1162. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9959-y>

Yang, K., Zhou, X., Zhao, H., & Tao, S. (2011). Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃-Cr₂O₃ composite coatings produced by atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1362–1371. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.061>

Zamani, P., & Valefi, Z. (2017). Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃, Cr₂O₃ and Cr₂O₃-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 316, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.022>

Zavareh, M. A. S. (2017). Fundamentals and Applications of Thermal Spray Coating Fundamentals and Applications of Thermal Spray Coating. *Canadian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(January 2018), 1–11.

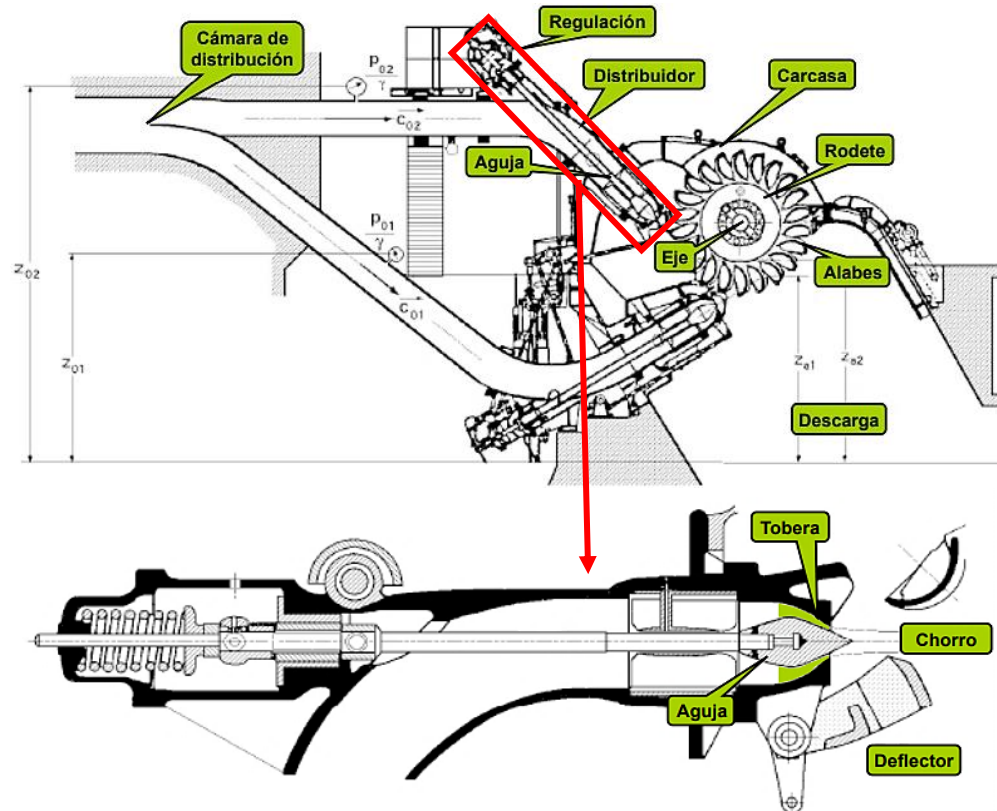
Zavareh, M. A., Sarhan, A. A. D. M., Razak, B. B. A., & Basirun, W. J. (2014). Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications. *Ceramics International*, 40(9 PART A), 14267–14277. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.017>

Zois, D., Lekatou, A., Vardavoulas, M., Panagiotopoulos, I., & Vazdirvanidis, A. (2008). A comparative microstructural investigation of nanostructured and conventional Al₂O₃ coatings deposited by plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(5–6), 887–894. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9268-z>

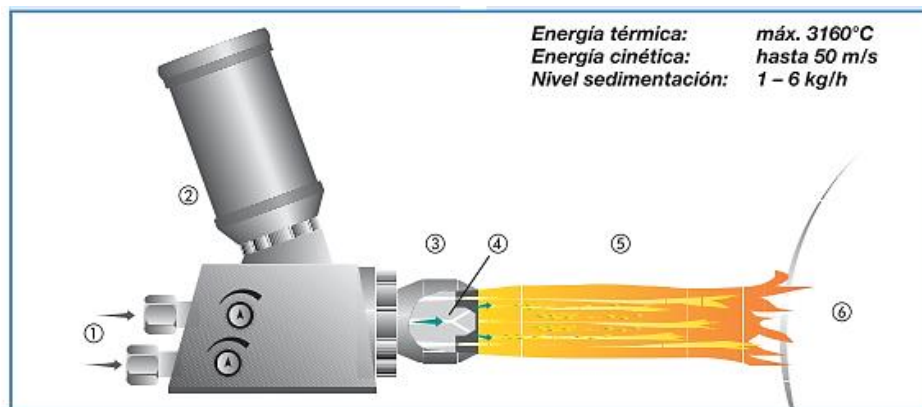
Zois, D., Lekatou, A., Vardavoulas, M., & Vazdirvanidis, A. (2010). Nanostructured alumina coatings manufactured by air plasma spraying: Correlation of properties with the raw powder microstructure. *Journal of Alloys and Compounds*, 495(2), 611–616. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.055>

Apéndices

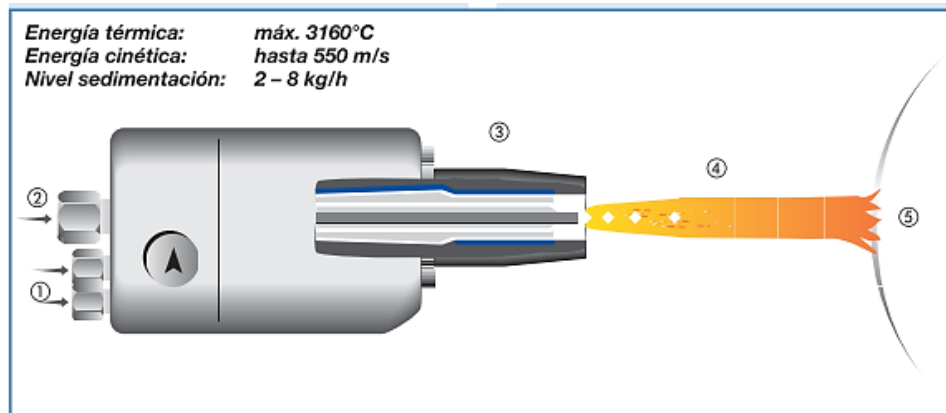
Apéndice A. Ubicación de la aguja de tobera de turbina dentro de la turbina Pelton (Perez Remesal & Renedo Esteban, 2019).



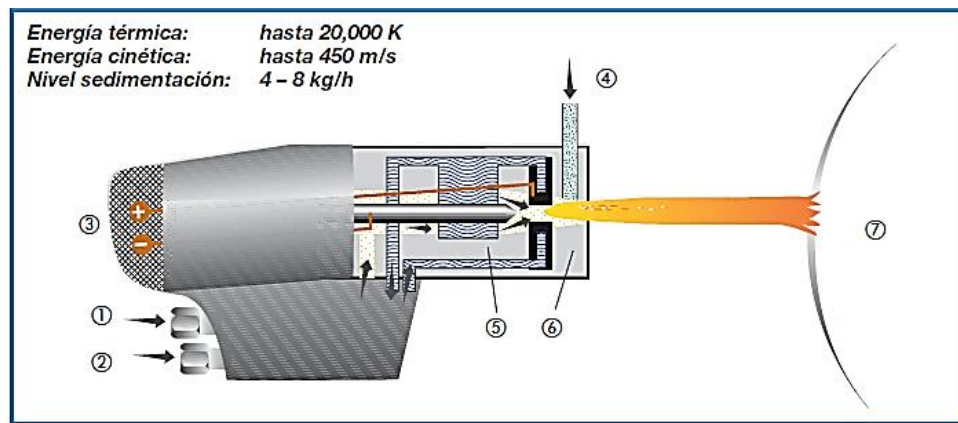
Apéndice B. Sistema de proyección térmica por llama de baja velocidad (*Flame Spray*) (S.A., 2007).



Nota. 1. Gas combustible/Oxígeno; 2. Recipiente para materia prima en polvo; 3. Boquilla del soplete; 4. Gas portador + polvo; 5. Llama de gas combustible/Oxígeno y partículas del material del recubrimiento; 6. Pieza de trabajo.

Apéndice C. Sistema de proyección térmica por llama de alta velocidad (HVOF) (S.A., 2007).

Nota. 1. Gas combustible/Oxígeno; 2 Polvo + gas; 3. Boquilla del soplete con o sin refrigeración por agua; 4. Llama de gas combustible/Oxígeno y partículas de material de recubrimiento; 5. Pieza de trabajo; 6. Cámara de combustión de gases.

Apéndice D. Sistema de proyección térmica por plasma atmosférico (APS) (S.A., 2007).

Nota. 1. Gas inerte, 2. Agua para refrigeración del sistema, 3. Conexión a corriente continua, 4. Material de recubrimiento en polvo, 5. Cátodo, 6. Ánodo, 7. Pieza de trabajo.