

ARTÍCULO INDUSTRIAL

APLICACIONES DE PROYECCIÓN TÉRMICA: RECUBRIMIENTO HVOF SOBRE COMPONENTE DE GENERACIÓN HIDRÁULICA DE ENERGÍA Y RECUBRIMIENTO POR ARCO ELÉCTRICO SOBRE ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA



C. Zuñiga^{1*}

¹Soldaduras Industriales. Medellín, Colombia

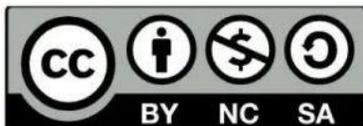
*jefetormorociado@soldinsas.com

KEYWORDS

Proyección térmica, proyección por oxígeno-combustible a alta velocidad, proyección por arco eléctrico, protección ante la corrosión y la abrasión.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados correspondientes a la elaboración de recubrimientos mediante proyección térmica, haciendo uso del proceso de oxígeno-combustible a alta velocidad y de arco eléctrico sobre una aguja de inyección de turbinas Pelton y tubos de calderas respectivamente. Para la obtención de los recubrimientos sobre agujas de turbinas Pelton se empleó como material de proyección carburo de tungsteno de referencia TAS 340 T con una tasa de deposición de 2,7 kg/hora a 15 cm del sustrato correspondiente a un acero inoxidable martensítico. Para los recubrimientos elaborados mediante proyección térmica por arco eléctrico se hizo uso de un alambre tubular de referencia comercial PMET 292 correspondiente a una aleación Fe-Cr depositado sobre tubos de caldera ASTM A192 grado B7 a una tasa de alimentación de 9,9 kg/hora. Mediante la técnica de oxígeno-combustible a alta velocidad se obtuvo un recubrimiento denso y fuertemente adherido al sustrato el cual posee una microestructura fina y homogénea, aumentando la vida útil de la aguja de inyección en turbina Pelton en 11 meses. Por otra parte, el recubrimiento elaborado mediante el proceso de proyección por arco eléctrico obtuvo una rugosidad media aritmética final Ra entre 1,5 y 2,5 μm y una dureza entre 60 y 65 Rc y después de inspecciones año tras año se pudo garantizar una vida útil de los tubos de caldera de por lo menos 5 años. Los resultados obtenidos indican que los recubrimientos depositados mediante oxígeno-combustible a alta velocidad pueden contribuir a la eficiencia en la transformación de energía hidráulica en energía eléctrica, mientras que los recubrimientos elaborados por proyección por arco eléctrico sobre los tubos de caldera pueden ayudar a la eficiencia en la transformación de energía térmica en energía eléctrica.



THERMAL SPRAYING APPLICATIONS: HVOF COATING SPRAYED ON A COMPONENT FOR HIDROELECTRIC POWER GENERATION AND ARC SPRAYED COATING ON INFRASTRUCTURE ELEMENTS

KEYWORDS

Thermal spray, high velocity oxygen-fuel, arc spray, corrosion and abrasion protection.

ABSTRACT

The present work shows the results corresponding to the manufacturing of coatings using the high velocity oxygen-fuel and electric arc spraying processes on a Pelton turbine injection needle and boiler tubes respectively. In order to manufacture the coating on a Pelton turbine needle, made of martensitic stainless steel, the tungsten carbide TAS 340 T feedstock powder was used. The spraying distance was 15 cm and the feed rate was 2.7 kg/hour. On the other hand, a tubular wire commercial reference PMET 292 corresponding to an Fe-Cr alloy was used to arc spraying the coating on ASTM A192 grade B7 boiler tubes with a feed rate of 9.9 kg/hour. From high velocity oxygen-fuel process, a dense and strongly adhered to the substrate coating was obtained, whose fine and homogeneous microstructure, increased the useful life of the turbine needle by 11 months. On the other hand, for the arc sprayed coating the arithmetic average roughness Ra is between 1.5 and 2.5 μm and its hardness is between 60 and 65 Rc. Annual inspections performed allow to establish that the useful life of the boiler tubes is at least 5 years. The results obtained indicate that high velocity oxygen-fuel coatings can contribute to the efficiency in the transformation of hydraulic energy into electrical energy, while electric arc sprayed coating on boiler tubes can help the efficiency in the transformation of thermal energy into electrical energy.

1. INTRODUCCIÓN

La proyección térmica es un proceso para la elaboración de recubrimientos que consiste en proyectar partículas metálicas, cerámicas, de polímeros o cermet, fundidas o en estado plástico sobre una pieza de trabajo denominada sustrato, el cual debe ser previamente preparado para proporcionar una superficie con características específicas que permitan cumplir satisfactoriamente las condiciones de funcionamiento del proceso. En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de proyección térmica.

La materia prima del recubrimiento se funde mediante una fuente de calor; a continuación, este material líquido o

fundido es impulsado por los gases del proceso hacia el sustrato, donde se solidifica y forma una capa sólida. El aspecto de la microestructura de un recubrimiento obtenido mediante proyección térmica se muestra en la Figura 2.

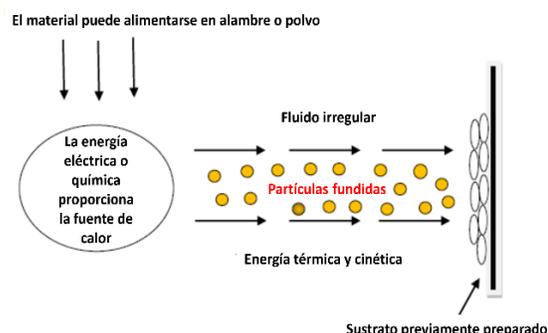


Figura 1. Esquema del proceso de proyección térmica.



Debido a que la adhesión del recubrimiento al sustrato consiste en una unión mecánica, es extremadamente importante limpiar y tratar cuidadosamente la superficie que se va a recubrir.

El proceso generalmente inicia con la eliminación, por métodos químicos o mecánicos, de las impurezas que puedan estar presentes en la superficie del sustrato y continúa con un proceso de desbaste con partículas abrasivas proyectadas a alta velocidad sobre la superficie a tratar. De acuerdo con lo anterior, el material del sustrato debe resistir los procedimientos químicos y mecánicos realizados para limpiar y dar rugosidad a la superficie.

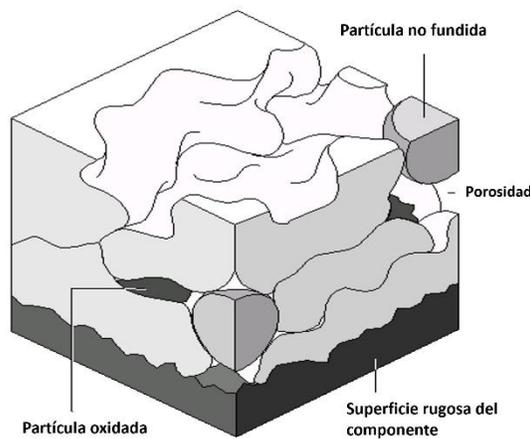


Figura 2. Esquema de la microestructura de un recubrimiento elaborado por proyección térmica. Modificado de [1].

Posteriormente, las partículas de la materia prima son calentadas hasta fundirlas y simultáneamente son proyectadas a gran velocidad contra la superficie a recubrir. Las partículas al impactar con el sustrato se deforman y se apilan entre ellas,

formando la capa que da origen al recubrimiento. Ver Figura 1 y Figura 2.

La materia prima para la elaboración de recubrimientos por proyección térmica puede ser cualquier material que no se descomponga al fundirse. Según el proceso de proyección térmica, el material de recubrimiento puede presentarse en forma de alambre o de polvo. La elección del material adecuado para una aplicación específica requiere conocimientos sobre el entorno de servicio y conocimientos específicos sobre los materiales. Además de sus propiedades físicas y térmicas como coeficiente de dilatación, densidad, conductividad térmica y punto de fusión, algunas características adicionales como la forma y la distribución del tamaño de las partículas, así como el proceso de fabricación del material en polvo influirán en el recubrimiento.

Los procesos de proyección térmica se clasifican según la fuente de energía empleada. La Figura 3 muestra los cuatro procesos más comúnmente utilizados en Colombia, dos de los cuales fueron empleados para la obtención de los recubrimientos realizados en el presente trabajo: Oxígeno-combustible a alta velocidad-HVOF (por sus siglas en inglés de High Velocity Oxygen-Fuel) y proyección térmica por arco eléctrico los cuales se describen a continuación:



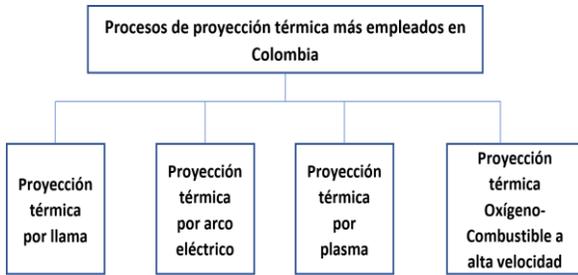


Figura 3. Diagrama de los procesos de proyección térmica más empleados en Colombia.

En el proceso conocido como *HVOF* se quema eficientemente oxígeno y un combustible gaseoso o líquido para producir alta energía térmica. Gracias a los cambios abruptos de presión que sufren los gases de combustión al interior de la antorcha, se produce alta energía cinética. Por lo anterior, estos gases alcanzan velocidades superiores a 1000 m/s e impulsan las partículas hacia el sustrato a velocidades mayores a 600 m/s y con una ganancia de calor controlada [2, 3, 4]. La alta velocidad que alcanzan las partículas en estado fundido o semifundido en el proceso de *HVOF* da lugar a un alto nivel de apilamiento entre ellas, produciéndose un recubrimiento con una microestructura fina y homogénea. En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso *HVOF*.

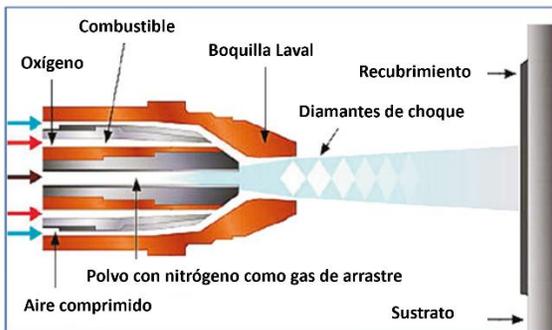


Figura 4. Esquema del proceso *HVOF*. Modificado de [1].

Por otra parte, en la proyección térmica por arco eléctrico, se utilizan dos alambres, preferentemente de la misma composición química, que se cargan eléctricamente con polaridad opuesta y se alimentan hacia la antorcha a velocidades adaptadas y controladas. Cuando los alambres se encuentran en el punto de contacto, se crea un arco eléctrico que funde continuamente sus extremos. Simultáneamente, se hace pasar a través del material fundido, una corriente de aire comprimido para atomizarlo y acelerarlo hacia el sustrato, para así formar el recubrimiento [5]. En la Figura 5 se muestra un diagrama del proceso de arco eléctrico. La cantidad de recubrimiento depositado por unidad de tiempo está directamente relacionada con la potencia del arco eléctrico (amperaje y voltaje) producido.

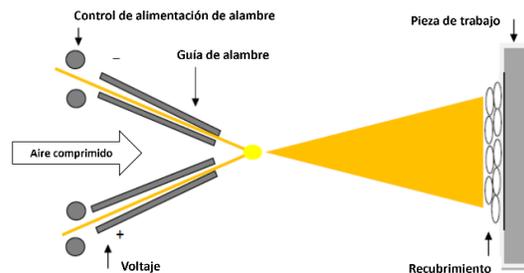


Figura 5. Esquema del proceso de proyección térmica por arco eléctrico. Modificado de [1].

Las diferentes técnicas de proyección térmica pueden ser empleadas en diversas aplicaciones con el objetivo de contribuir a la solución de problemáticas que se puedan presentar en el desempeño de



componentes de diferentes industrias. Sin embargo, en la industria colombiana aún hace falta conocimiento y desarrollo en los procesos de proyección térmica.

De otra parte, Colombia está clasificado como un país hidroeléctrico [6]. Las máquinas de generación hidroeléctrica más comunes en el territorio nacional son las turbinas Francis y Pelton. Estas son populares por su adaptabilidad a muchas condiciones de caudal y alturas de agua. Sin embargo, el rendimiento y la vida útil de la turbina pueden verse reducidos a causa de la cavitación y la abrasión, esta última dependiente de los productos arrastrados por el fluido como arena, limo y grava. Alrededor de estas plantas de generación existe una industria para la reparación y mantenimiento de componentes que requieren aplicaciones con procesos de proyección térmica donde el proceso HVOF ha sido el más comúnmente empleado.

Además, fenómenos como la corrosión impactan la economía nacional desde el punto de vista del costo de mantenimiento en algunos elementos de la infraestructura. Es por esto que, en Europa y Estados Unidos, mástiles de alta tensión, así como puentes y estructuras han sido protegidos contra la corrosión mediante recubrimientos elaborados por arco eléctrico y llama [7-11]. En Colombia este tipo de aplicaciones son incipientes, pero podrían incrementarse en los próximos años debido al crecimiento que se ha dado en infraestructura por lo que es necesario que surjan nuevas empresas o que empresas dedicadas a la protección contra la corrosión adapten esta tecnología y de esta forma, incrementar su portafolio para atender la demanda que se avecina.

Por lo anterior, en el presente trabajo se muestran algunos de los resultados obtenidos en componentes que fueron recubiertos mediante el proceso de HVOF y proyección por arco eléctrico en agujas para turbinas Pelton y tubos de caldera respectivamente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el recubrimiento elaborado por HVOF se empleó como material de partida carburo de tungsteno de referencia TAS 340 T, constituido aproximadamente por 86 % en peso de WC, 10 % Co y 4 % Cr. Este polvo corresponde a un material aglomerado y posteriormente sinterizado, con morfología esferoidal. Su densidad aparente varía entre 2,9 - 5,8 g/cm³ y su tamaño de grano está comprendido entre 10 - 38 μm. Por su parte, el material de las agujas de las turbinas Pelton utilizadas como sustrato corresponde a un acero inoxidable martensítico 1.4313 cuya composición química se muestra en la Tabla 1.

Por otra parte, para la elaboración del recubrimiento mediante proyección térmica por arco eléctrico, se empleó un alambre tubular, referencia comercial PMET 292, a partir del cual se puede producir recubrimientos nanoestructurados, de alta dureza y resistentes a la corrosión, con un entorno de servicio de hasta 926 °C.

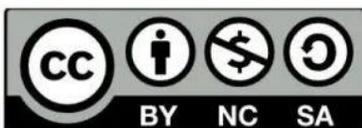


Tabla 1. Composición química del material de las agujas a recubrir.

Elemento	Contenido de cada elemento [% en peso] ¹
C	< 0,05
Cr	11,5 – 14,0
Mn	0,5 – 1,0
Mo	0,5 – 1,0
Ni	3,5 – 5,5
P	0,03
S	0,03
Si	0,6

¹ El elemento del balance es el hierro

Los recubrimientos elaborados con este material son útiles en una amplia variedad de aplicaciones, como en tubos de calderas, ventiladores, y superficies antideslizantes. La composición química del alambre empleado se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química alambre referencia comercial PMET 292.

Contenido de cada elemento [% en peso] ²							
C	Nb	Cr	B	Mn	W	Si	Mo
1,4	7,0	16,0	4,5	0,5	8,0	0,5	3,2

² El elemento del balance es el hierro.

Por su parte, el material de los tubos de caldera utilizados como sustrato corresponde al ASTM A192 grado B7, su composición química se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química del material de los tubos de caldera ASTM A192 grado B.

Elemento	Contenido de cada elemento [% en peso] ³
C	0,06 – 0,18
Mn	0,27 – 0,63
P	0,035
S	0,035
Si	0,25

³ El elemento del balance es el hierro

Para la elaboración de los recubrimientos mediante ambas técnicas, la preparación superficial de los sustratos fue realizada in-situ utilizando un abrasivo angular de óxido de aluminio grado G25, que fue proyectado a aproximadamente 15 cm del sustrato con una presión de 0,5 MPa. Al final de este proceso se obtuvo una rugosidad media aritmética Ra entre 3,5 y 4,0 μm, la cual fue comprobada con un rugosímetro digital TIME 3100.

Una vez preparada la superficie de los sustratos, se elaboraron los recubrimientos mediante HVOF y proyección por arco eléctrico de acuerdo con lo indicado en las tablas 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4. Parámetros del proceso de elaboración del recubrimiento mediante HVOF.

	Jet - A	Oxígeno	Agua	Nitrógeno
Presión [MPa]	0,4	1,5	1,4	2,0
Flujo [l/min]	0,27	544	39	18



Tabla 5. Parámetros del proceso de proyección térmica por arco eléctrico.

Diámetro del alambre [mm]	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Presión de aire [MPa]	Distancia de proyección [cm]
1,6	180 -200	29 -30	0,45	15-20

La elaboración del recubrimiento mediante HVOF se realizó en la empresa Proymet en Bogotá-Colombia, utilizando el sistema de combustión líquida Tafa 4000. La proyección se realizó a 15 cm del sustrato a una tasa de deposición de 2,7 kg/hr. En la Figura 6 se muestra el recubrimiento depositado mediante HVOF sobre la aguja de turbina Pelton.

Por su parte, la elaboración del recubrimiento mediante arco eléctrico se llevó a cabo con la empresa Ferresolda utilizando el sistema de proyección térmica Arc Tafa Spray. La aplicación se realizó en la Central Térmica de Carbón Termotasajero en San Cayetano, Norte de Santander-Colombia.



Figura 6. Recubrimiento depositado mediante HVOF sobre aguja de turbina Pelton.

En la Figura 7 se muestra el proceso de aplicación del recubrimiento sobre las tuberías de las calderas. La aplicación se realizó a 15 cm del sustrato a una tasa de deposición de material de 9,9 kg/hora, recubriendo un área de la superficie de los

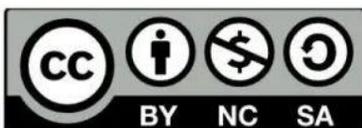
tubos correspondiente a 16,9 m². Una vez finalizado este proceso, no se realizaron trabajos posteriores de mecanizado ni de relleno de poros con sellante o pintura sobre el recubrimiento.



Figura 7. Aplicación del recubrimiento mediante proyección térmica por arco eléctrico.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

Para cumplir los requisitos de funcionamiento, la superficie de la aguja de la turbina Pelton debe tener un acabado de tipo espejo, a fin de minimizar las pérdidas por fricción y las posibles tensiones que limitan la velocidad del fluido y favorecen los fenómenos de abrasión y cavitación. A partir de lo anterior, una vez aplicado el recubrimiento se realizó un mecanizado en dos etapas. Inicialmente, se realizó desbaste con un disco abrasivo a base de carburo con grano grado 80 que se trabajó entre 85 - 115 RPM. Posteriormente, en la segunda etapa, se realizó un pulido con un disco diamantado hasta alcanzar un espesor cercano a 400 μm , el cual fue medido con un medidor marca Elcometer, y una dureza entre 60 y 70 Rc, medida con un durómetro portátil utilizando el método UCI. Con el fin de evitar el calentamiento excesivo durante el proceso de desbaste y pulido,



sobre la superficie recubierta se aplicó un aceite soluble en agua.

Finalmente, la aguja recubierta fue puesta en operación y se le realizaron las respectivas inspecciones, encontrando que esta pieza tuvo un aumento en su vida útil de 11 meses, ya que una aguja sin recubrimiento experimenta una vida útil media de 1 mes, ver Figura 8.

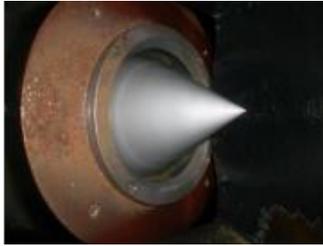


Figura 8. Aguja de turbina Pelton recubierta tras 11 meses de funcionamiento.

El desempeño de la aguja recubierta garantiza que el rendimiento de la turbina se sitúe en el 92% de aprovechamiento estimado de la energía hidráulica.

De otra parte, el espesor promedio del recubrimiento depositado mediante arco eléctrico, medido con un equipo Elcometer, fue de aproximadamente 1 mm. Adicionalmente, su rugosidad media aritmética Ra fue entre 1,5 y 2,5 μm y su dureza, medida con un durómetro portátil mediante el método UCI, fue entre 60 y 65 Rc.

Una vez finalizado el proceso de aplicación del recubrimiento sobre los tubos de caldera, la central eléctrica comenzó a funcionar y la tubería fue expuesta a los efectos de la fatiga por corrosión del lado fuego, a la erosión por las cenizas volantes, a corrosión de la pared del lado agua, a fatiga térmica, a erosión por caída de escoria, a erosión del

soplador de hollín, a sobrecalentamiento a corto / largo plazo, a daños por limpieza química y corrosión por picaduras.

A los tubos recubiertos se les realizó una inspección al cabo de un año de operación, en la que se evidenció que las zonas metálicas estaban en perfecto estado. En la Figura 9 se muestran algunos de los tubos de caldera después de 1 año de funcionamiento. Posteriormente, se realizaron las siguientes inspecciones año tras año y se pudo establecer que los tubos recubiertos tienen una vida útil de al menos 5 años.

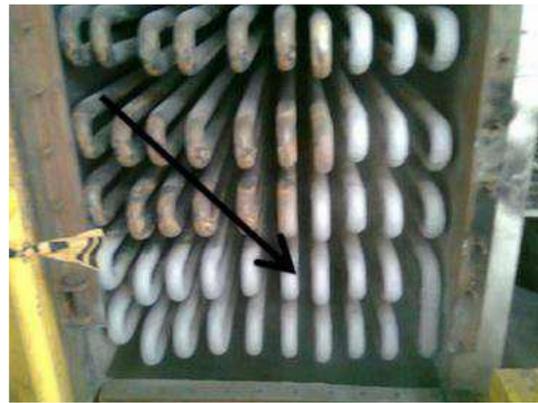
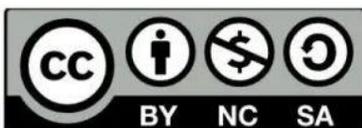


Figura 9. Tubos de caldera recubiertos después de un año de funcionamiento.

4. CONCLUSIONES

Se seleccionaron los materiales de partida y las condiciones del proceso para la elaboración de recubrimientos mediante proyección térmica por HVOF y arco eléctrico, sobre una aguja de inyección de una turbina Pelton y tuberías de caldera respectivamente. A partir de este trabajo se plantean las siguientes conclusiones:

- Antes de realizar la selección del material de recubrimiento para las



agujas de las turbinas Pelton, deben conocerse las características del fluido que estará en contacto con ellas y los mecanismos de desgaste que este puede desarrollar. De igual forma, es necesario conocer el tipo de caldera y las características de los fluidos que pueden atacar a los tubos que las constituyen.

- La correcta selección de la técnica de proyección térmica a utilizar, así como de los parámetros de elaboración del recubrimiento y su control durante todo el proceso son claves para el buen desempeño de las piezas recubiertas en las condiciones a las que estarán expuestas durante su funcionamiento.
- Tanto el recubrimiento elaborado mediante HVOF sobre la aguja de inyección de fluido en una turbina Pelton, como el depositado mediante arco eléctrico sobre los tubos de una caldera aumentaron la vida útil de los componentes recubiertos, reduciendo así los costos asociados a la interrupción para mantenimiento y sustitución de piezas y evitando la pérdida de ingresos para las empresas. Lo anterior, contribuye al mejoramiento de la eficiencia en la generación de energía eléctrica.

5. REFERENCIAS

- [1] Oerlikon Metco. *An Introduction to Thermal Spray*, 2016.
- [2] Fauchais, P. L., *Thermal Spray Fundamentals From Powder to Part*, Springer, 2017.

[3] Tucker, R. C., “Thermal Spray Processes”. In: *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, 2013.

[4] Tucker, R. C., “Surface Engineering”. In *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International., 2013.

[5] Malek, M. H. A., Saad, N. H., Abas, S. K., *et al.*, “Thermal arc spray overview”, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol 46, no.1, 2013.

[6] Martínez, V., Castillo, O. L., “The political ecology of hydropower: Social justice and conflict in Colombian hydroelectricity development”. *Energy Research and Social Science*, vol 22, pp. 69-78, 2016.

[7] Armor Thane, *Corrosion protection coatings against rust, Chemical, environment*, [Online Available]: <https://www.armorthane.com>

[8] Sulzer Metco, *Corrosion protection under insulation*, [Online Available]: <https://www.oerlikon.com>

[9] Oerlikon Metco, *Corrosion Coating of Win track High-Voltage Masts*, [Online Available]: <https://www.oerlikon.com>

[10] Oerlikon Metco. *Corrosion Protection for Shipping Containers*, [Online Available]: <https://www.oerlikon.com>

[11] Dorfman, M. R., “Thermal spray coatings”. En *Handbook of Environmental Degradation Of Materials*, 3rd Editon, Elsevier Inc., 2018.

