

# Una aproximación a la tecnología de proyección térmica

## An approach to thermal spray technology

Ing. José Alfredo Morales Torres<sup>1\*</sup>, Ing. John Jairo Olaya Flórez<sup>2\*</sup> e Ing. Héctor Fernando Rojas Molano<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Metalúrgico, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional de Colombia. Gestor del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación COTECMAR. Bogotá, D.C. – Colombia. \*amorales@cotecmar.com

<sup>2</sup>Doctor en Materiales Universidad de México, Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C. – Colombia. \*joolaya@unal.edu.co

<sup>3</sup>Ingeniero Metalúrgico, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador Universidad Libre de Colombia. Bogotá, D.C. – Colombia. \*hectorf.rojas@unilibrebog.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 15/12/2012 Fecha de aceptación del artículo: 28/12/2012

### Resumen

La tecnología de proyección térmica comprende un grupo de procesos de aplicaciones de recubrimientos que proporcionan a las superficies funciones de protección y mejora del rendimiento del sustrato o componente. Existen muchos tipos y formas de materiales que pueden ser aspersados térmicamente para proporcionar protección contra la corrosión, desgaste y sirviendo además como barrera térmica. Esta técnica también es utilizada para restaurar y reparar piezas o componentes, sin mencionar una variedad de aplicaciones. Este artículo pretende ser una guía de referencia de la tecnología de proyección térmica que abarca los principios de la técnica, mecanismos de formación de la capa y de adhesión del recubrimiento/sustrato, procesos, tipos de revestimientos, aplicaciones y el análisis de un caso de estudio.

### Palabras Clave

XRD Difracción de Rayos X, XRF Fluorescencia de Rayos X, SEM Microscopía Electrónica de Barrido, CLM Microscopía Níser Confocal, VC Ensayo de Voltamperometría Cíclica.

### Abstract

Thermal spray technology comprises a group of coating application processes which provides sur-

faces protection functions and performance enhancement of substrate or component. There are several types and forms of materials that can be sprayed thermally to provide them protection against corrosion, wear, and also it serves as a thermal barrier. This technique is also used to restore and repair parts or components, not to mention a variety of applications. This article attempts to be a reference guide of thermal spray technology, covering the technical principles, mechanisms of layer formation and adhesion of the coating / substrate, processes, types of coatings, applications and analyzing a case of study.

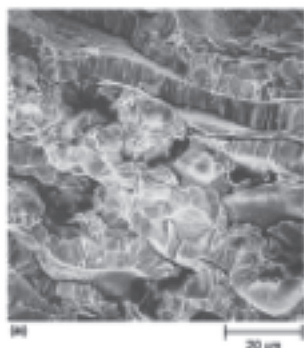
### Key Words

XRD X-Ray Diffraction, XRF X-Ray Fluorescence, SEM Scanning Electron Microscopy, CML Confocal Microscopy Laser, VC Cyclic Voltammetry Test.

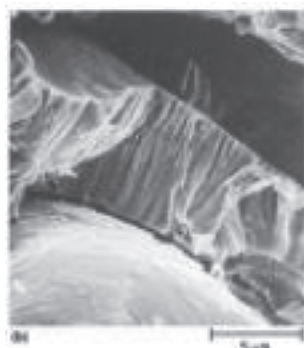
### Introducción

La *proyección térmica*, conocida también como *aspersión térmica*, *termorrociado* o su nombre genérico en inglés *Thermal Spray*, se puede definir como el proceso mediante el cual se aplica un recubrimiento metálico o no metálico mediante la deposición de partículas fundidas o semifundidas, las cuales son aceleradas y proyectadas a alta presión sobre la superficie de un material base o sustrato previamente

Gota formadora de la estructura laminar



Grano formador de la estructura columnar



**Fotografía 1.** Micrografías SEM, detalles de secciones transversales de un recubrimiento de tungsteno rociado térmicamente por plasma [3].

preparado. Este proceso se puede agrupar en tres grandes categorías: *proyección a la llama, por arco eléctrico y plasma*; mientras que los recubrimientos se pueden aplicar en forma de polvos, alambres o varillas, que cuando impactan sobre la superficie generan una acumulación de las partículas, generando una estructura o película laminar delgada [1]. En la fotografía 1 se observa la formación de estas películas laminares; en (a) se evidencia la condición normal del tipo de estructura laminar y en (b) el detalle de la formación del grano columnar. Para que este proceso sea eficiente se requiere de tasas de enfriamiento muy altas, superiores a  $10^6$  K/s [2].

### Procesos del recubrimiento

Un recubrimiento es una región superficial de un material con propiedades diferentes de las del material base [4]. Su propósito es reemplazar, modificar y lubricar superficies; además, optimiza la superficie del material y le da resistencia mecánica al desgaste y a la fricción, otorga ligereza y permite el aislamiento térmico y eléctrico [5].

Las características para los distintos procesos de recubrimientos dependen de las temperaturas de trabajo y de los espesores obtenidos [6].

### Mecanismos de formación de la capa de un recubrimiento

El material fundido o parcialmente fundido es proyectado sobre el sustrato con una alta energía ciné-

tica y térmica, formando un recubrimiento compacto por agregación de las partículas proyectadas [7]. La figura 1 muestra el esquema de formación de las capas de las partículas proyectadas sobre el material base; el primer mecanismo es el de generar la proyección de las partículas hacia el sustrato; el segundo, la partícula impacta sobre la superficie a proteger; y como fase final, se establece el mecanismo de anclaje entre la partícula proyectada y el sustrato que depende de la preparación superficial de éste último. Este esquema de formación queda condicionado a la presentación del recubrimiento en forma de alambre o polvo, así mismo seguido de un calentamiento y proyección de las partículas a velocidades y presiones en función de los equipos y tecnologías.



**Figura 1.** Esquema de formación de la capa.

Mecanismos de adhesión recubrimiento/sustrato  
Los mecanismos de adhesión en la interfase recubrimiento y sustrato, por lo general se hacen de tres formas: *unión mecánica, unión metalúrgica y unión física*. La figura 2 es una representación esquemática de los posibles defectos que se pueden presentar en un recubrimiento obtenido por proyección térmica, dependiendo de los mecanismos de adhesión.

En función del material depositado, del sistema de proyección térmica elegido y de los parámetros del proceso, se obtendrá una superficie con características específicas de porosidad, dureza, rugosidad, resistencia al desgaste o a la corrosión [8].

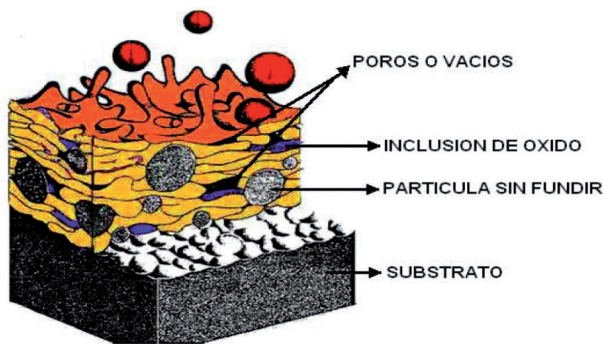


Diagrama esquemático de una capa rociada térmicamente.

**Figura 2.** Defectos típicos de un recubrimiento obtenido por Proyección Térmica [7]

### Material base

De la misma forma que los materiales proyectados, los materiales base que se puede utilizar en la técnica de proyección térmica son de tipo metálico y no metálico. Se pueden clasificar de la siguiente manera: a) todos los metales y aleaciones: (todo tipo de aceros, fundición gris y nodular, aleaciones de Ni y Co, metales ligeros y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones); b) materiales no metálicos: (materiales cerámicos, ciertos polímeros, materiales compuestos, biomateriales y materiales biológicos)

### Materiales proyectados

Los recubrimientos por proyección térmica se pueden aplicar prácticamente a todas las formas de superficies metálicas y no metálicas, incluyendo la madera, vidrios y papel; el recubrimiento más frecuente es el acero, como material ferroso, y níquel, titanio, aluminio, cobre y magnesio entre otros, junto con sus respectivas aleaciones como materiales no ferrosos [9]. A continuación se realiza una clasificación general por el grupo funcional de materiales: Metales Puros (Mo, Ti, Ni, Ta, Al, Zn, etc.), Aleaciones (Ni-Cr, Ni-Cr-Al-Y, Fe-Cr-B-SiC,

aceros, bronce, etc.), Cerámicas ( $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ , WC etc.), Cermets ( $Cr_3C_2/NiCr$ ,  $CW/Co$ ,  $ZrO_2/Ni-Al$ , etc.), Polímeros (poliéster, polietileno, etc.), Materiales Biocompatibles (hidroxiapatita).

## Procesos de Proyección Térmica

### Proceso de Proyección Térmica a la Llama

Este proceso se subdivide en proyección con alambre y proyección con polvos.

La proyección con alambre es uno de los más antiguos que se utilizan desde su desarrollo. El calor generado se debe a una reacción química de una fuente de fusión que se da entre los gases de combustión (acetileno, metilacetileno, propadieno, propano, propileno, gas natural, etc.) en combinación con el oxígeno. El acetileno es el más utilizado como gas de combustión debido a las altas temperaturas que conduce, pudiendo llegar hasta los  $2480^{\circ}C$  para generar la fusión de los alambres usados en el proceso [10].

El proceso de proyección con polvos también utiliza gases de combustión como fuentes de calor, pero su materia prima es el recubrimiento en polvo, el cual es almacenado en una tolva pequeña montada en la parte superior de la pistola de proyección. Este proceso ofrece la ventaja de proyectar materiales no metálicos que no están disponibles en forma de varilla o alambre, mientras que sus desventajas son la menor resistencia a la unión, el aumento de la porosidad y la menor cohesión o adhesión entre el recubrimiento y el sustrato debido a las bajas velocidades de proyección de las partículas en el proceso.

Un ejemplo de esta técnica fue el estudio de la resistencia a la corrosión con recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxón 21071, producidos con el Sistema de Proyección Térmica a la Llama llevado a cabo por Dimaté y colaboradores

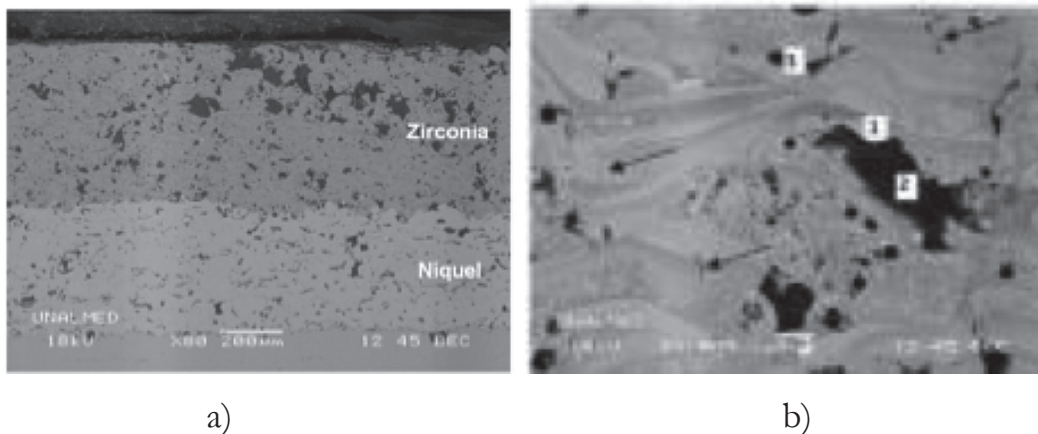
[11], cuyos depósitos se realizaron en piezas navales a base de aleaciones de bronce, utilizando los métodos de preparación superficial de granallado por arena, granallado metálico y pulido con disco abrasivo. La caracterización microestructural se hizo por medio de las técnicas de metalografía convencional [12], XRD [13, 14], SEM [15, 16, 17], XRF [18, 19], CLM [20, 21] y se realizó un estudio de resistencia a la corrosión por la técnica VC [22], junto con la prueba de espectroscopía de impedancia electroquímica para establecer la degradación de los recubrimientos respecto al tiempo [23, 24].

También se desarrollaron estudios previos para el sector naval colombiano con estas técnicas convencionales, tales como:

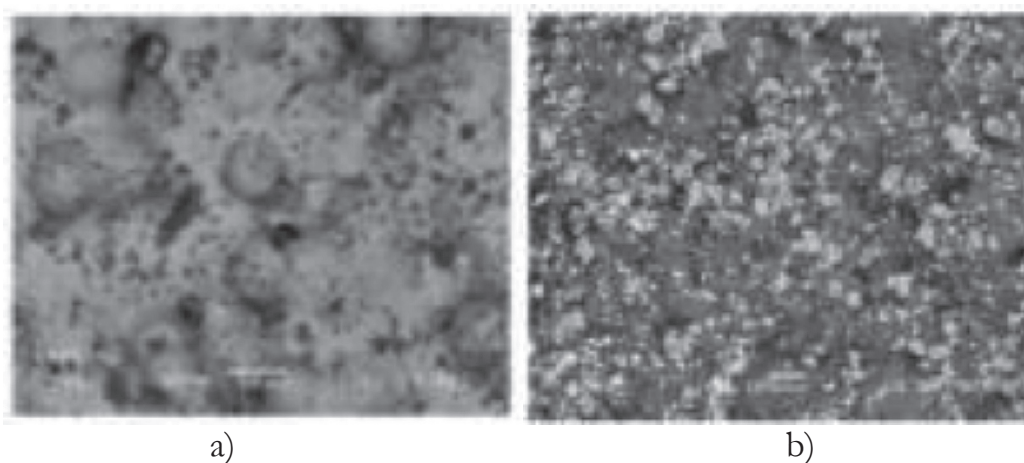
- Estudio de análisis de fallas en piezas industriales navales susceptibles a ser recuperadas por el proceso de proyección térmica [25].
- Comportamiento mecánico de los recubrimientos de Ni-Al y Fe-Cr-Ni-C en función a las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante, adherencia, desgaste abrasivo, desgaste por deslizamiento y flexión en cuatro puntos; para este caso utilizaron recubrimientos interfases como Ni-Al-Mo y Fe-Cr-NiC para disminuir el grado de porosidad entre el recubrimiento y el sustrato [26].
- Estudio de la microestructura de la capa de

enlace a base de Ni y un cerámico de zirconia y alúmina, cuyo resultado fue la formación de un recubrimiento con dos capas laminares de estructura tetragonal de alúmina amorfa en la capa superior y en la inferior una estructura granular generada por precipitados de zirconia monolítica [27]. La fotografía 2 ilustra el resultado de este estudio con la descripción de las capas en (a) y los defectos típicos de estos recubrimientos en (b).

- Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos WC y Ni-WC depositados por proyección térmica a la llama sobre sustratos de acero al carbono, cuyos resultados obtenidos fueron el mejoramiento a la resistencia al desgaste abrasivo en función de la baja sinterización de las partículas con una morfología puntiaguda y regular del recubrimiento sobre los sustratos como se observa en la fotografía 3 [28].
- Investigación sobre protección contra la corrosión por medio de sales fundidas, utilizando recubrimientos de acero al carbono en forma de polvos autofundibles; en este caso, las pruebas gravimétricas arrojaron una deficiente protección de las partículas proyectadas térmicamente en función de las mezclas de sales corrosivas empleadas (20%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 80% de  $\text{V}_2\text{O}_5$ ) respecto a las temperaturas de trabajo de las sales (700°C y 850°C) [29].



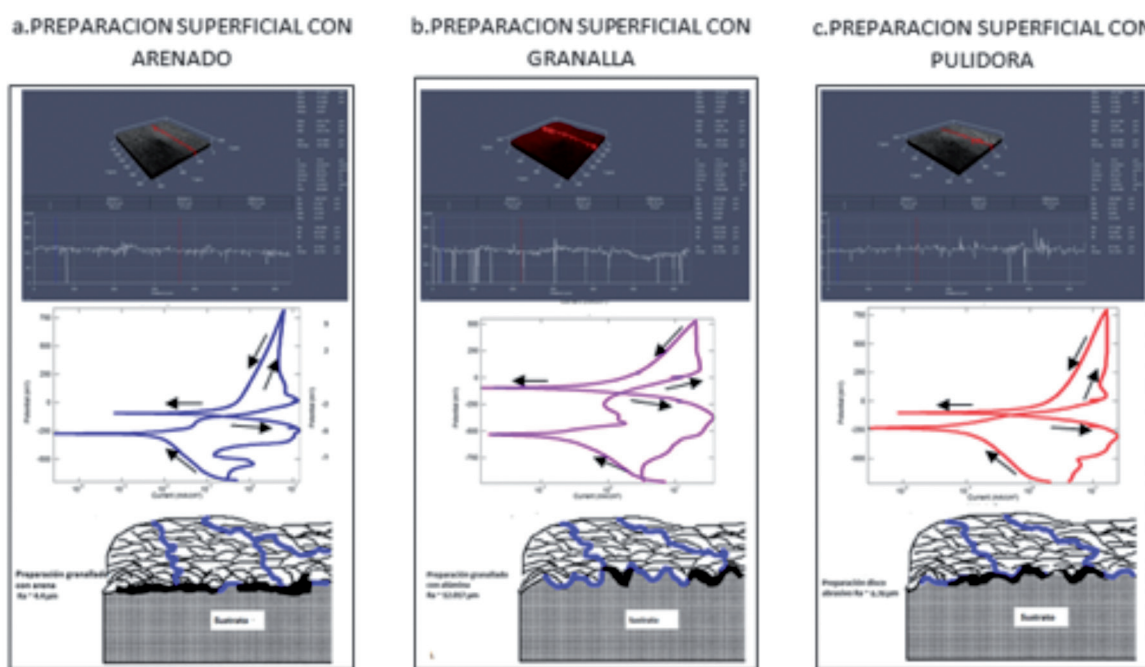
**Fotografía 2.** Micrografía SEM de la sección transversal de los recubrimientos obtenidos a (a) 800X y (b) 1000X. Grietas con indicación de flechas. Partículas sin fundir (1). Poros interlaminares (2). Poros (3) [27].



**Fotografía 3.** Característica morfológica de la superficie de los recubrimientos obtenidos (a) Ni-Al; (b) Ni-Al y Ni-W-Co [28]

- Estudio de la resistencia a la corrosión de recubrimientos con alto contenido de Ni, Ni-Co-W y SiC – Ni, cuyo objetivo fue el de verificar el comportamiento de estos recubrimientos para proteger un sustrato de acero AISI-SAE 1010 expuesto a medios corrosivos agresivos en soluciones de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 0,2M, empleando dos equipos diferentes de proyección térmica [30].

Algunos de los resultados obtenidos por Dimaté se pueden observar en las figuras 3 y 4 y en las tablas 1 y 2 respectivamente. La figura 3 detalla el proceso de caracterización del sustrato mediante perfilometría confocal y ensayo voltiamperimétrico con sus respectivas preparaciones superficiales. La tabla 1 resume los datos más importantes de los ensayos efectuados al sustrato. La figura 4



**Figura 3.** Proceso de Caracterización del Sustrato [11]

Tabla 1. Resumen de resultados del proceso de Caracterización del Sustrato [11]

Preparación del sustrato		Pulidora (a)	Granallado con Arena (b)	Granallado con Alúmina (c)	Observaciones
Pruebas	XRD (a)	Estructura cristalina: FCC Cartas concordantes: 01-070-3038 [31] y 00-001-0972 [32]	Estructura cristalina: FCC Cartas concordantes: 01-089-4789[33]	Estructura cristalina: HCP Cartas concordantes: 03-065-5973 [34]	Los resultados de la prueba de difracción de rayos X concuerdan con los estudios realizados por Afshar et al [35], Hwang et al [36] y Balaji et al [37]
	Rugosidad (b)	6,78µm	4,42µm	12,01µm	
Prueba de Corrosión mediante Voltamperometría Cíclica (c)		Potencial (mV): entre -154,89 y -230,36 Corriente (mA/cm <sup>2</sup> ): entre -0,023 y 1,39x10 <sup>-1</sup>	Potencial (mV): entre -103,9 y -275,69 Corriente (mA/cm <sup>2</sup> ): entre -0,004 y 7,80x10 <sup>-3</sup>	Potencial (mV): entre -98,8 y -523,11 Corriente (mA/cm <sup>2</sup> ): entre -0,078 y 2,12x10 <sup>-1</sup>	Los resultados de la prueba de voltamperometría cíclica concuerdan con los estudios realizados por Rahmouni et al [38]
Mecanismo de Corrosión (d)	Dependencia del recubrimiento	Alto	Alto	Bajo	Delaminación de recubrimientos por pitting [39] Aumento de corrosión por bordes afilados [40] Anclaje del recubrimiento según unión mecánica [41]
	Grado de Adhesión	Medio	Bajo	Alto	

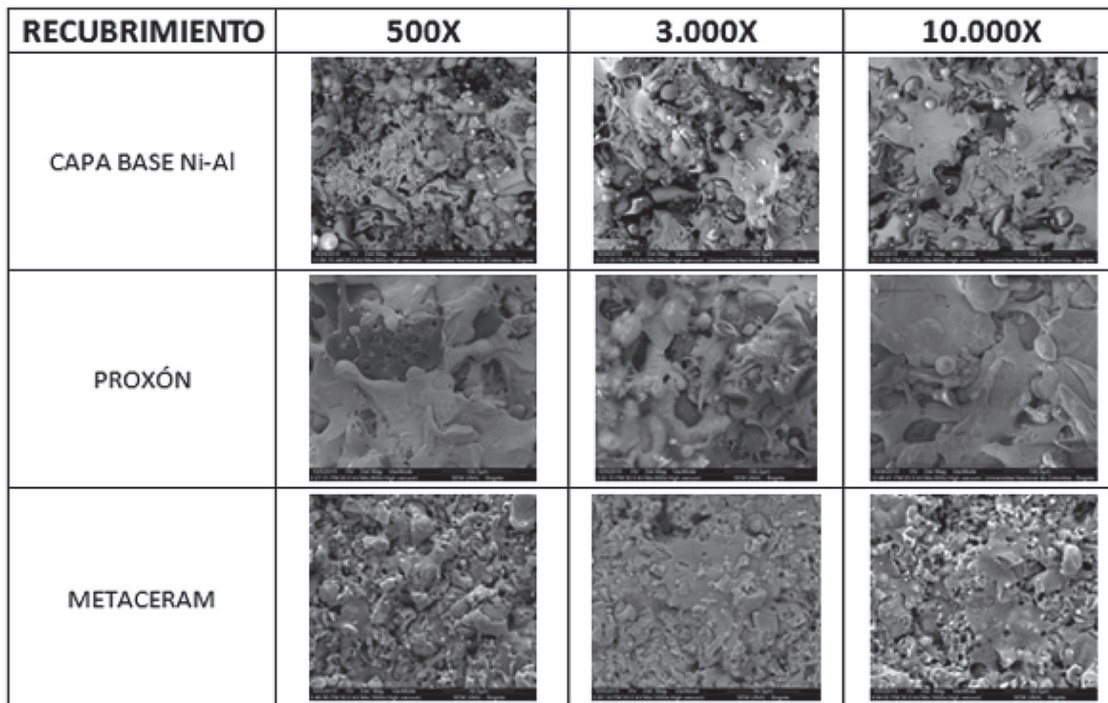


Figura 4. Proceso de Caracterización de los Recubrimientos [11]

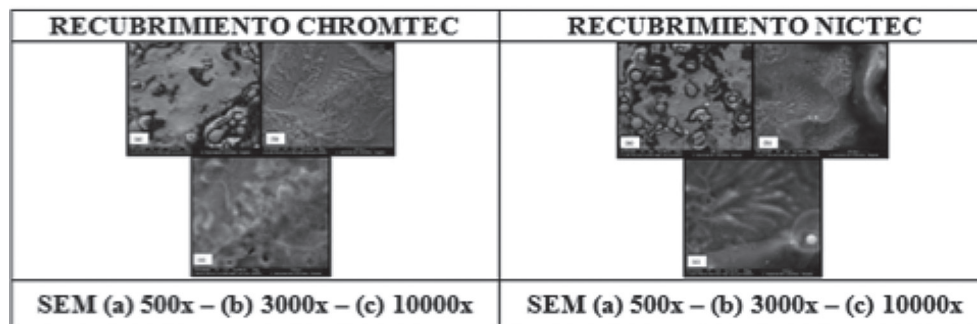
**Tabla 2.** Resumen de resultados del proceso de Caracterización de los Recubrimientos [11]

Pruebas		Recubrimientos	Capa Base Ni-Al (I)	Proxón (II)	Metacerán (III)	Observaciones
Micrografías SEM (a)	Palidora	Deposito semihomogéneo	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	1. Partículas sin fundir 2. Partículas semifundidas
	Arena	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	3. Óxidos 4. Poros
	Alúmina	Deposito heterogéneo	Deposito heterogéneo	Deposito homogéneo	Deposito homogéneo	5. Microgrietas [42, 43, 44, 45, 46, 47]
XRD (b)			Estructura cristalina: $CS^{*1}$  Cartas concordantes: 03-065-0430 [48] <sup>1</sup> , 00-003-1043 [49] <sup>1</sup> , 00-001-1239 [50] <sup>1</sup> , 00-014-0481 [51] <sup>1,2</sup>	Estructura cristalina: Ortorrómbica <sup>1</sup> y FCC <sup>2</sup> [52]  Cartas concordantes: 00-028-0005 [53] <sup>1</sup> , 01-070-3038 [31] <sup>1</sup>	Estructura cristalina: Romboédrico <sup>1</sup> - <sup>2</sup>  Cartas concordantes: 00-002-1362 [54] <sup>1,2,3</sup>	Todos estos resultados de la prueba de difracción de rayos X concuerdan con los estudios realizados por: Conguan Xu et al [55], Wang Liang et al [56] y Cellard et al [57, 58]
Rugosidad (c)		Palidora	18,8829µm	21,340µm	16,186µm	La rugosidad final del recubrimiento es determinada por el tamaño de las partículas [40]
		Arena	17,510µm	20,930µm	16,836µm	
		Alúmina	17,231µm	22,463µm	17,177µm	
Pruebas de Corrosión (d)	Voltamperogramas Cíclicos (d1)	Palidora	NA	Potencial (mV): entre -97,42 y -512,7 Corriente (mA/cm²): entre -0,0054 y $1,10 \times 10^{-1}$	Potencial (mV): entre -115,2 y -288,01 Corriente (mA/cm²): entre -0,015 y $8,03 \times 10^{-2}$	Valores calculados según pendientes de Tafel [59, 60]
		Arena	NA	Potencial (mV): entre -98,707 y -455,5 Corriente (mA/cm²): entre -0,014 y $3,75 \times 10^{-2}$	Potencial (mV): entre -123,8 y -323,23 Corriente (mA/cm²): entre -0,0027 y $1,95 \times 10^{-1}$	
		Alúmina	NA	Potencial (mV): entre -96,923 y -357,99 Corriente (mA/cm²): entre -0,0127 y $8,39 \times 10^{-2}$	Potencial (mV): entre -109,9 y -173,31 Corriente (mA/cm²): entre -0,0019 y $5,42 \times 10^{-2}$	
	Impedancia Electroquímica (d2)	Palidora	NA	$1,32 \times 10^2$ kohms/cm² (1h) $1,20 \times 10^1$ kohms/cm² (24h) $2,32 \times 10^2$ kohms/cm² (168h)	$2,89 \times 10^2$ kohms/cm² (1h) $1,30 \times 10^2$ kohms/cm² (24h) $1,67 \times 10^1$ kohms/cm² (168h)	Degradación del recubrimiento Proxón > a 24hs de tratamiento [61, 62, 63], en función de $R_p$ [64] Degradación del recubrimiento Metacerán > 1hr de tratamiento [65, 66, 67]
		Arena	NA	$6,48 \times 10^2$ kohms/cm² (1h) $3,53 \times 10^2$ kohms/cm² (24h) $5,67 \times 10^2$ kohms/cm² (168h)	$3,91 \times 10^{12}$ kohms/cm² (1h) $8,56 \times 10^{14}$ kohms/cm² (24h) $1,65 \times 10^{13}$ kohms/cm² (168h)	
		Alúmina	NA	$1,59 \times 10^2$ kohms/cm² (1h) $7,34 \times 10^2$ kohms/cm² (24h) $2,19 \times 10^2$ kohms/cm² (168h)	$1,07 \times 10^7$ kohms/cm² (1h) $2,13 \times 10^2$ kohms/cm² (24h) $1,95 \times 10^{12}$ kohms/cm² (168h)	

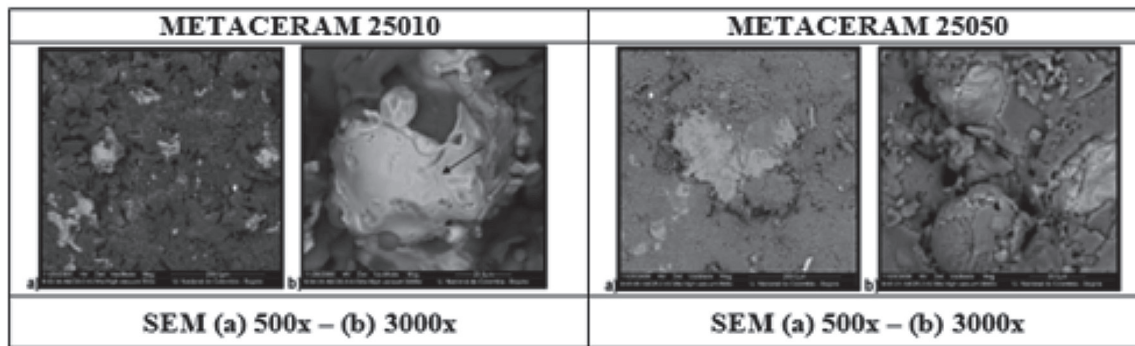
ilustra las micrografías de los recubrimientos de capa base Ni-Al, Proxón y Metaceram utilizados en el estudio a 500, 3.000 y 10.000 X; mientras que la tabla 2 sintetiza los datos obtenidos con

diferentes pruebas para los recubrimientos.

Resultados de otros estudios se muestran en la figura 5 y la figura 6 respectivamente.



**Figura 5.** Caracterización de los recubrimientos producidos con Proyección Térmica por Llama usando el equipo Súper Jet Eutalloy – Recubrimientos Chromtec (Eutalloy 10680) y Nitec (Eutalloy 10224) [68]



**Figura 6.** Caracterización de los recubrimientos producidos con Proyección Térmica por Llama usando el equipo Súper Jet Eutalloy – Recubrimientos Metaceram 25050 y 25010 [68]

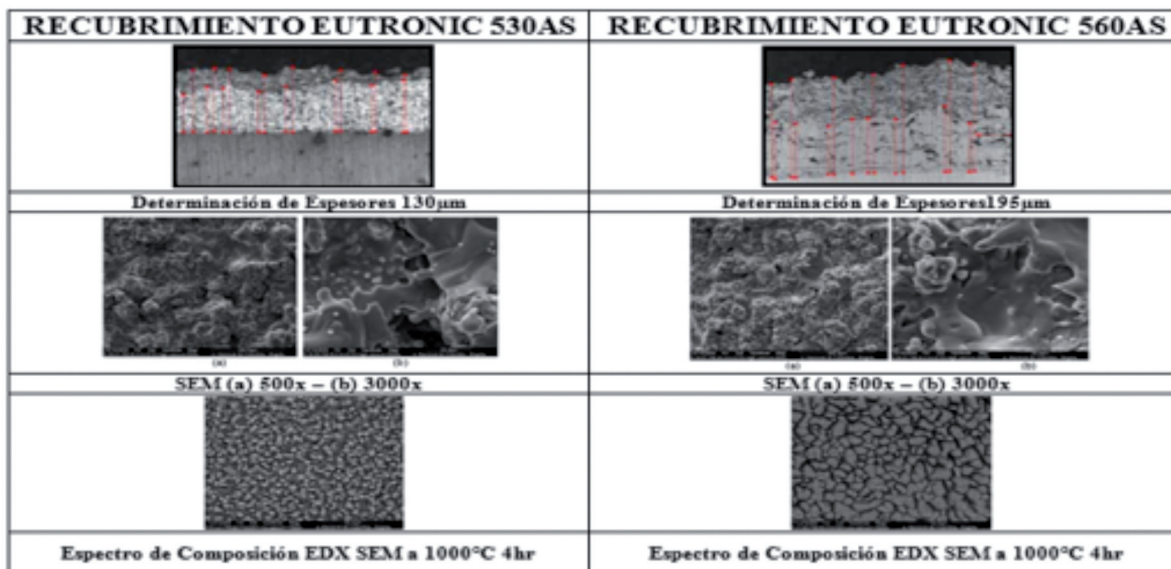
### Proceso de Proyección Térmica por Arco Eléctrico

Este proceso emplea como materia prima la combinación de dos alambres metálicos que sirven como electrodos que al entrar en contacto en la punta de la pistola de proyección, generan un corto circuito formando un arco eléctrico; esto hace que los alambres se fundan y se proyecten en forma de partículas, en función de la presión del aire del sistema (equipo de proyección), sin necesidad de la utiliza-

ción de los gases de combustión. Los resultados de este estudio son mostrados en la figura 7.

### Proceso de Proyección Térmica por HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)

La proyección térmica de alta velocidad, HVOF, es una de las más importantes técnicas en el desarrollo de recubrimientos protectores. Durante la proyección HVOF, las velocidades de las partículas son significativamente mayores y, por tanto, el mo-



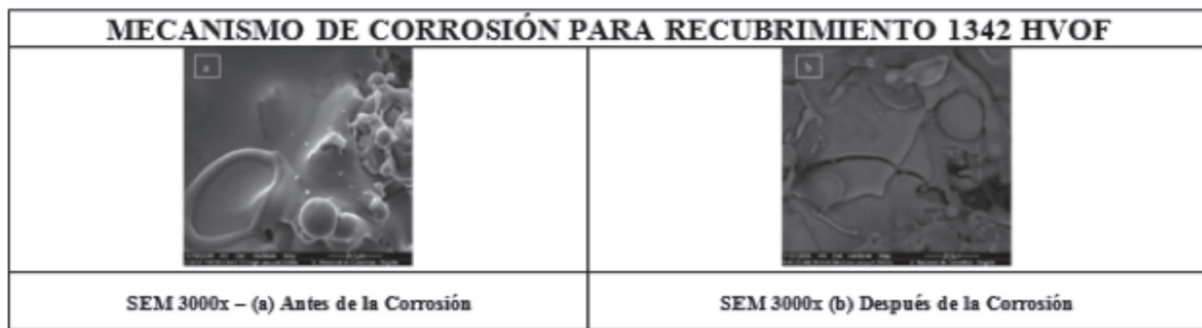
**Figura 7.** Caracterización de los recubrimientos de acero inoxidable y al carbono producidos con Proyección Térmica por Arco – Recubrimientos Eutronic 530AS y 560AS



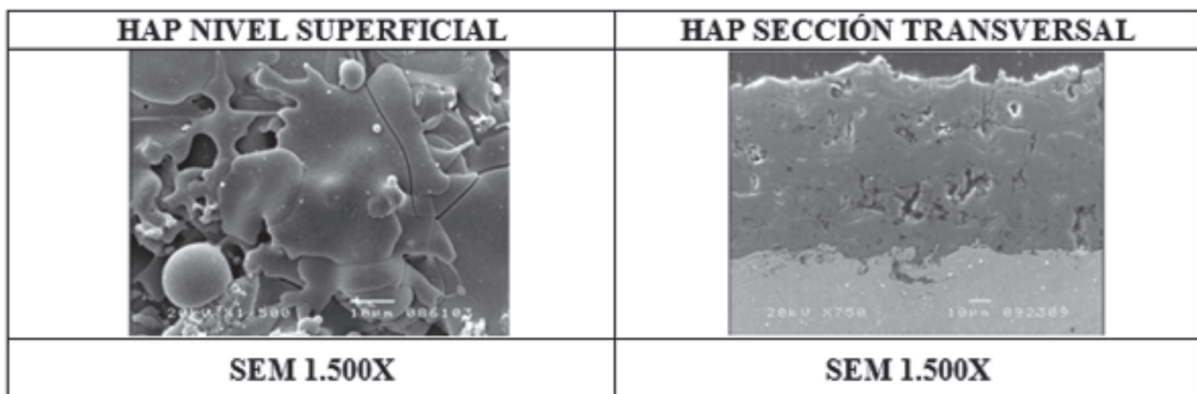
vimiento colectivo de partículas y el choque de estas adquieren una mayor importancia. Como resultado, la densidad del recubrimiento crece y la progresiva deposición de las gotas forma capas más delgadas [69]. Su eficiencia depende en gran medida de la interacción térmica substrato-recubrimiento que determina su estructura y las propiedades de la región interfacial e influye esencialmente en la cinética de la construcción del recubrimiento [70]. Resultados de este estudio se puede apreciar en la figura 8.

### Proceso de Proyección Térmica por Plasma

Este proceso tuvo su origen en Alemania [72]. Utiliza material de recubrimiento también en forma de polvos [73], cuya velocidad de salida es del orden de los 600 m/seg [74] que se funden por la interacción de un gas inerte ionizado que produce el arco eléctrico, calentándose con las partículas a proyectar. [75], [76]. Los resultados de este estudio se puede apreciar en la figura 9.



**Figura 8.** Caracterización de los recubrimientos nanocompuestos producidos con Proyección Térmica por Arco y HVOF – Recubrimientos 140 MXC y 1342 HVOF [71]



**Figura 9.** Caracterización mediante SEM a recubrimientos HAP (Hidroxiapatita) producidos mediante Plasma [77].

### Referencias

1. Handbook of Thermal Spray Technology, 2004 ASM International. Pág. 3
2. H. Barth, Ed., Modern Methods of Particle Size Analysis, John Wiley & Sons, 1984
3. J. Bull, AEA Technology Introduction to Thermal Spray Processing
4. M<sup>a</sup> Dolores Salvador Moya. Recubrimientos: Protección contra Corrosión y el Desgaste. Instituto de Tecnología de Materiales 2011
5. Nancy Quaranta, Marta Caligaris, Graciela

- Mansilla y Fernando Palmieri. *Análisis comparativo de recubrimientos sobre aluminio. Congreso CONAMET/SAM 2004*
6. R. W. S. R. Knight, "Thermal Spray Forming of Materials,," Powder Metal Technologies and Applications, ASM Handbook, ASM International., vol. 7, Pág. 408–419, 1998.
  7. J. Marulanda Rociado Térmico.
  8. C. Juárez Mariche, A. Barba Pingarrón, A. Vázquez Vaamonde, J. Damborenea González, Modificación de recubrimientos obtenidos por proyección térmica mediante haces de alta densidad energética. 2004
  9. F. E. García Costales, J. M. Cuetos Mejido. Encuentro de Tribología (20, 21 Setiembre 2001)
  10. ASM Handbook Volume 13. Corrosion. Pág. 1043 – 1051
  11. Dimaté Castellanos, Laura Marcela. Resistencia a la corrosión en recubrimientos Metaceram 25050 y Proxon producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2011
  12. O. García, "Obtención y caracterización electroquímica y estructural de recubrimientos de cromo decorativo a partir de soluciones de cromo trivalente," Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
  13. D. A. Bonell, "Scanning probe microscopy and spectroscopy: theory, techniques, and applications," Edited by Dawn Bonnell. Wiley-VCH. Second Edition, 2001.
  14. J. F. Watts, "X-ray photoelectron spectroscopy," Surface Science Techniques, 1994.
  15. J. E. R. H.D. Hagstrum, J.C. Tracy, "Electron spectroscopy of solid surfaces. Experimental methods in catalytic research," R.B Anderson y P.T. Dawson Editores. Academic Press 1976.
  16. R. Kuehl, "Diseño de experimentos. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones," Thomson Learning 2001.
  17. "Purdue University," Disponible en: <http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>, vol. Consultada el 1 Mayo 2011, 2011.
  18. D. e. <http://www.amptek.com/xrf.html>, "XRay Fluorescence Spectroscopy (XRF)," Consultada el 29/04/2011.
  19. C. k. E. C. Richard Brundle, Jr., and Shaun Wilson, "Encyclopedia of Material Characterization," Butxetworch-Heinemann, 1992.
  20. Z. Manual, "Manual Microscopio Confocal."
  21. C. Microscopy, «Disponible en: [http://www.lookfordiagnosis.com/mesh\\_info.php?term=Microscopy%2C+Confocal&lan](http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Microscopy%2C+Confocal&lan)
  22. O. García, "Obtención y caracterización electroquímica y estructural de recubrimientos de cromo decorativo a partir de soluciones de cromo trivalente," Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
  23. A. Handbook, "Corrosion," Science and Technology. American Society of Metals. International Committe USA, Vol. 13, 1992.
  24. N. Perez, "Electrochemistry and Corrosion Science," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004.
  25. J. Lucena, "Análisis de falla de piezas de la industria naval que pueden ser recuperadas por técnicas de proyección térmica,," Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, 2008.
  26. J. C. Jorge Muñoz, "Análisis mecánico y tribológico de los recubrimientos Fe-Cr-Ni-C y Ni-Al-Mo," Dyna, Vol. 153, 2007.
  27. A. G. L. Gonzalez Hernandez, Esperanza, Tamayo Castrillon, Ana Victoria (Autor) and E. F. Restrepo Hoyos, Hernandez, Fredy "Análisis de la microestructura y de las fases de recubrimiento de zirconia-alúmina ( $ZrO_2Al_2O_3$ ) elaborados por proyección térmica," Dyna (Medellín), Vol. 077, 2010.
  28. J. B. S. Echeverri, F. Vargas, "Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono," Scientia et Technica, vol. Vol XIII, 2007.
  29. A. G. J. Marulanda, J. Vitola, "Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico," Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
  30. F. V. Juan Montoya, Jorge Calderon, "Recubrimientos Ni-SiC y Ni-Co-W depositados por proyección térmica," Dyna, Vol. 76, 2009.
  31. P.-P. JCPDS. "01-070-3038".

32. P.-P. JCPDS, "00-001-0972 ".
33. P.-P. JCPDS, "01-089-4789 ".
34. P.-P. JCPDS, "03-065-5973 ".
35. A. Afshar, et al., "Electrodeposition of graphite-bronze composite coatings and study of electroplating characteristics," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 187, Pág. 293-299, 2004.
36. Hwang, et al., "Comparison of phosphor bronze metal sheet produced by twin roll casting and horizontal continuous casting," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7, Pág. 495-503, 1998.
37. R. Balaji, et al., "Electrodeposition of bronze-PTFE composite coatings and study on their tribological characteristics," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, Pág. 3205-3211, 2006.
38. K. Rahmouni, et al., "Corrosion of copper in 3% NaCl solution polluted by sulphide ions," *Corrosion Science*, Vol. 47, Pág. 3249-3266, 2005.
39. W.-M. Zhao, et al., "Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 190, Pág. 293-298, 2005.
40. E. Çelik, et al., "Effect of grit blasting of substrate on the corrosion behaviour of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 116-119, Pág. 1061-1064, 1999.
41. Y. Y. Wang, et al., "Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings," *Thin Solid Films*, Vol. 485, Pág. 141-147, 2005.
42. A. International., "Handbook of Thermal Spray Technology," 2004.
43. R. Dhiman, et al., "Predicting splat morphology in a thermal spray process," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, Pág. 7789-7801, 2007.
44. B. Uyulgan, et al., "Wear behaviour of thermal flame sprayed FeCr coatings on plain carbon steel substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, Pág. 204-210, 2007.
45. R. Westergård, et al., "An evaluation of plasma sprayed ceramic coatings by erosion, abrasion and bend testing," *Wear*, Vol. 246, Pág.12-19, 2000.
46. N. Kahraman and B. Gülenç, "Abrasive wear behaviour of powder flame sprayed coatings on steel substrates," *Materials & Design*, Vol. 23, Pág. 721-725, 2002.
47. C. Navas, et al., "Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Pág. 6854-6862, 2006.
48. P.-P. JCPDS, "03-065-0430 ".
49. P.-P. JCPDS, "00-003-1043 ".
50. P.-P. JCPDS, "00-001-1239 ".
51. P.-P. JCPDS, "00-014-0481 ".
52. S. e. a. Nunes, "Handbook 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," ASM International, 1992.
53. P.-P. JCPDS, "00-028-0005 ".
54. P.-P. JCPDS, "00-002-1362 ".
55. C. Xu, et al., "Study on salt spray corrosion of Ni-graphite abrasible coating with 80Ni20Al and 96NiCr-4Al as bonding layers," *Surface and Coatings Technology*, Vol. In Press, Corrected Proof.
56. W. Liang, et al., "Microstructures and properties of PVD aluminum bronze coatings," *Thin Solid Films*, Vol. 376, Pág. 159-163, 2000.
57. A. Cellard, et al., "Wear resistance of chromium oxide nanostructured coatings," *Ceramics International*, Vol. 35, Pág. 913-916, 2009.
58. A. Cellard, et al., "Optimization of chromium oxide nanopowders dispersion for spray-drying," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 27, Pág. 1017-1021, 2007.
59. C.-H. Hsu, et al., "Effects of CrN/EN and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EN duplex coatings on corrosion resistance of ADI," *Thin Solid Films*, Vol. 517, Pág. 5248-5252, 2009.
60. S. H. Cho, et al., "Corrosion behavior of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings in hot lithium molten salt," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 399, Pág. 212-218, 2010.
61. J. M. Guilemany, et al., "Comparative study of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings," *Corrosion Science*, Vol. 48, Pág. 2998-3013, 2006.

62. M. M. Verdian, et al., "Electrochemical impedance spectroscopy of HVOF-sprayed NiTi intermetallic coatings deposited on AISI 1045 steel," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 507, Pág. 42-46, 2010.
63. M. M. Verdian, et al., "Corrosion performance of HVOF and APS thermally sprayed NiTi intermetallic coatings in 3.5% NaCl solution," *Corrosion Science*, Vol. 52, Pág. 1052-1059, 2010.
64. C. Liu, et al., "An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part II.: EIS interpretation of corrosion behaviour," *Corrosion Science*, Vol. 45, Pág. 1243 - 1273, 2003.
65. Y. Wang, et al., "Microstructure, spallation and corrosion of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13%TiO<sub>2</sub> coatings," *Corrosion Science*, Vol. 51, Pág. 2924-2931, 2009.
66. J. M. Guilemany, et al., "Effects of thickness coating on the electrochemical behaviour of thermal spray Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 153, Pág.107-113, 2002.
67. D. C. S. J.R. Scully, M.W. Kendig,, "Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation," ASTM Publication, 1993.
68. Proyecto Marco de Investigación de Desarrollo e Innovación en Recuperación de Piezas Metálicas por Proyección Térmica, bajo el estudio de Caracterización de Componentes Navales se presentó en la ciudad de Cartagena D.T. el 15 de Diciembre de 2009, el Informe de las Actividades de Caracterización de los Recubrimientos Producidos por Proyección Térmica.
69. Parker, D.W. y Kutner, G.L. *Adv. Mater. Proces.*, 7,1994: 31-35..
70. Thorpe, M.L. y Richter, H J J . *Therm. Spray Technol*, 1 (2), 1992: 161-170.
71. Dimaté et al. "Producción y Resistencia a la corrosión de recubrimientos WC-Co y Fe-Nb-Cr-W, aplicados por la técnica de proyección térmica". *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería No. 79. Julio – Septiembre 2010. Pág. 7-14.*
72. Kvernes I. Espelan M. and Norhom. O. Plasma spraying of alloys and ceramics. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. Vol. 17. 1988. Pág. 8-16
73. Ducos, M. and Reitz, V. Coating properties and characteristics optimization of the operation of a plasma generator for thermal spraying. *International Thermal Spraying Conference. Montreal, Canadá. September 1986. Pág. 8-12*
74. Vardelle, M.; Vardelle, A. and Fauchais, P. Influence of the percentage of hydrogen and of the size and injection velocity distributions on the momentum and heat transfer between plasma jet and ceramic powders during plasma spraying process. *International Thermal Spraying Conference, Montreal, Canadá. September 1986. Pág. 8-12*
75. Nicoll, A. R. Protective coatings and their processing thermal spray. *Del curso: High Temperature Materials and Coatings. Finland. June 1984. Pág.24-29]*
76. Herman, H. Revestimientos pulverizados por plasma. *Mundo Científico.*
77. Gaona Latorre Mireia. "Recubrimientos biocompatibles obtenidos por Proyección Térmica y estudio in vitro de la función osteoblástica". *Barcelona, Junio 2007]*