



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Efecto de la temperatura de depósito sobre la Resistencia al desgaste en recubrimientos de Nitec 10224 (Ní + 5% Fe, B, Si) y Metaceram 23075 (Ní + 40% WC/Co) obtenidos con la técnica de proyección térmica

Diego Fernando Otálora Sánchez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería - Materiales y procesos

Bogotá, Colombia

2014

Efecto de la temperatura de depósito sobre la Resistencia al desgaste en recubrimientos de Nitec 10224 (Ni + 5% Fe, B, Si) y Metaceram 23075 (Ni + 40% WC/Co) obtenidos con la técnica de proyección térmica

Diego Fernando Otálora Sánchez

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Materiales y procesos

Director:

Ph.D., Jose Edgar Alfonso Orjuela

Codirector (a):

Ph.D., Jhon Jairo Olaya Florez

Línea de Investigación:

Ingeniería de Superficies y Corrosión

Grupo de Investigación:

AFIS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería - Materiales y procesos

Bogotá, Colombia

2014

A mi padre y mi madre que nunca dejaron de creer en mí y me apoyaron incondicionalmente siempre para mi bienestar.

A mi esposa por apoyarme, tener paciencia y nunca dejar de creer en mí.

A mi hijo por ser el motor que nos pone en marcha a mí y a mi familia.

Agradecimientos

Al PhD. Ing. Jhon Jairo Olaya por el apoyo y el ánimo y la confianza depositada en mí para la realización de éste proyecto. Al profesor PhD. Jose Edgar Alfonso Orjuela, por la confianza depositada en mí, al PhD, Ing. Fabio Castillejo Nieto por su optimismo y apoyo constante, al Msc. Ing. Hernando Jimenez por la ayuda y el apoyo, al Ing. Carlos Rodelo, a Jhon Jairo Fajardo por su sinceridad y ayuda; y a mis compañeros Fabio Vallejo, Giovanni, Sergio Castro, y a todas las personas que se me olvida mencionar pido disculpas, ya que no sería posible nombrarlas a todas.

A Cotemar ya que sin ellos no hubiera sido posible realizar éste proyecto, a Proymet por la eficiencia y apoyo en la preparación de muestras.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el depósito de recubrimientos a base de Níquel y a base de Níquel - Tungsteno sobre sustratos de hierro, con preparación de superficie mediante granallado por arena, utilizando la técnica de proyección térmica por llama. Básicamente, se estudió la influencia que tiene la temperatura de depósito del recubrimiento sobre las propiedades estructurales, morfológicas y en la resistencia al desgaste. Los recubrimientos fueron caracterizados estructuralmente mediante difracción de rayos X (DRX); la morfología de la superficie se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopia laser confocal (MLC). La composición química se determinó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y la respuesta al desgaste se evaluó mediante pruebas de desgaste abrasivo a tres cuerpos, bola sobre disco y rayado. Los resultados de DRX permitieron establecer que los recubrimientos son policristalinos y tienen una estructura cristalográfica cubica centrada en el cuerpo (BCC) para todas las temperaturas de depósito; el análisis de MEB determinó que las superficies de las películas disminuyen su porosidad a medida que la temperatura de depósito aumenta y las pruebas de desgaste mostraron que los recubrimientos son más resistentes a ésta prueba que el sustrato.

Palabras claves: Proyección térmica por llama, desgaste, abrasión, granallado, temperatura de depósito.

Abstract

The results in the deposition of Nickel-based and Nickel-Tungsten-based coatings on iron substrates, with surface preparation by sand blasting are presented in this work, using the technique of thermal spraying flame. Basically, we studied the influence of the temperature of deposition of the coating on the structural, morphological and wear resistance properties. The coatings were structurally characterized by X-ray diffraction (XRD); the surface morphology was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and confocal laser microscopy (MLC). The chemical composition was determined by X-ray fluorescence (XRF) and wear was evaluated by testing three-body abrasive wear, ball-on-disk and striped. XRD results it was established that the coatings are polycrystalline and have a cubic crystal structure, body centered cubic (BCC) for all deposition temperatures; SEM analysis determined that the surfaces of the films decreases their porosity as the deposit temperature increases and wear tests, show that the coatings are more resistant to this test than the substrate.

Keywords: Flame thermal spraying, wear, abrasion, sand blasting, deposition temperature.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas.....	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción	
.....	21
1. Antecedentes.....	25
1.1 Antecedentes Nacionales:.....	25
1.1.1 Proyección térmica Metaceram y Proxon.....	25
1.1.2 Desgaste por adhesión, abrasión y corrosión.....	27
1.1.3 Resistencia al desgaste.....	27
1.1.4 Resistencia al desgaste.....	28
1.2 Antecedentes Internacionales:.....	30
1.2.1 Caracterización de la porosidad.....	30
1.2.2 Resistencia a la abrasión.....	31
1.2.3 Resistencia a la corrosión.....	32
1.2.4 Abrasión a tres cuerpos.....	32
1.2.5 Erosión y desgaste abrasivo.....	33
1.2.6 Desgaste abrasivo WC-CoCr depositado por HVOF.....	34
1.2.7 Investigación y aplicaciones intermetálica por proyección térmica.....	36
1.2.8 Caracterización de recubrimientos por proyección térmica mediante pruebas de rayado.....	37
1.2.9 Mecanismos de daño y comportamiento de las grietas de recubrimientos depositados mediante proyección térmica.....	38
1.2.10 Efecto de la distancia de proyección térmica.....	40
1.2.11 Evaluación de la resistencia de la unión de adhesión/cohesión.....	41
1.2.12 Mejora de la resistencia al desgaste con proyección térmica.....	42
1.2.13 Propiedades micromecánicas y el comportamiento al desgaste por rayadura.....	43
2. Marco Teórico.....	45
2.1 Proyección térmica.....	45
2.1.1 Historia.....	45
2.1.2 Descripción de los procesos:.....	49
2.1.2.1 Parámetros de la proyección térmica.....	54
2.1.2.2 Mecanismo de adherencia:.....	55
2.1.3 Descripción de los procesos:.....	57
2.1.3.1 Calentamiento por combustión.....	58

2.1.3.1.1	Combustión por llama	58
2.2	Recubrimientos	68
2.2.1	Nitec 10224	68
2.2.2	Metaceram 23075:	69
2.3	Preparación de la superficie	70
2.3.1	Limpieza y Manejo	71
2.3.2	Rugosidad	71
2.3.2.1	Chorro de Arena	72
2.4	Ensayos mecánicos y desgaste	73
2.4.1	Desgaste	73
2.4.1.1	Desgaste adhesivo	74
2.4.1.2	Desgaste abrasivo	75
2.4.1.2.1	Categorías del desgaste abrasivo	76
2.4.1.2.2	Medidas de desgaste abrasivo	81
2.4.1.3	Desgaste por fatiga	84
2.4.2	Deslizamiento en seco mediante Pin on Disk	84
2.4.3	Rayado o “scratch test”	89
2.4.4	Dureza	93
2.5	Métodos de Caracterización de materiales	95
2.5.1	Difracción de Rayos X (DRX, XRD)	95
2.5.2	Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX, XRF):	96
2.5.3	Microscopía Electronica de Barrido (MEB, SEM):	98
2.5.4	Microscopía Confocal:	100
3.	Metodología.....	102
3.1	Preparación de la superficie	102
3.1.1	Nitec	105
3.1.2	Metaceram 23075	106
3.2	Producción de recubrimientos	106
3.3	Diseño de Experimentos	107
4.	Resultados y Discusión.....	112
4.1	Microestructura y composición química de los recubrimientos	112
4.1.1	Nitec 10224	112
4.1.1.1	Fluorescencia de rayos X (FRX):	112
4.1.1.2	Difracción de rayos X (DRX)	113
4.1.1.3	Microscopía Electrónica de Barrido SEM:	115
4.1.1.4	Microscopía Confocal	117
4.1.2	Metaceram 23075	118
4.1.2.1	Fluorescencia de rayos X (FRX):	118
4.1.2.2	Difracción de rayos X (DRX):	119
4.1.2.3	Microscopía Electrónica de Barrido SEM:	121
4.1.2.4	Microscopía Confocal:	124
4.2	Evaluación de la resistencia al desgaste y a la adherencia de los recubrimientos: 125	
4.2.1	Nitec	125
4.2.1.1	Dureza:	125
4.2.1.2	Desgaste Abrasivo y adhesivo:	127
4.2.1.2.1	Abrasión a tres cuerpos:	127

4.2.1.2.2 Adherencia (Scratch Test):.....	129
4.2.1.2.3 Pin on disk	134
4.2.1.3 Confocal:.....	136
4.2.2 Metaceram.....	138
4.2.2.1 Dureza:	138
4.2.2.2 Desgaste Abrasivo y adhesivo:	140
4.2.2.2.1 Abrasión a tres cuerpos:	140
4.2.2.2.2 Adherencia (Scratch Test):.....	142
4.2.2.2.3 Pin on disk	147
4.2.2.3 Confocal:.....	149
4.3 Recuperación de piezas.....	152
4.3.1 Proceso de recuperación	152
5. Conclusiones y recomendaciones.....	158
5.1 Conclusiones.....	158
5.2 Recomendaciones.....	160
5.3 Glosario.....	160
Anexos.....	XIX

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1 Curva de voltamperometría cíclica del recubrimiento óxido de cromo con capa base, preparado con granalla con alúmina, arenado y pulidora [5].....	26
Figura 1.2 a) Micrografía SEM de la sección transversal del recubrimiento de bronce electrones retodispersados a 1000X b) Recubrimiento Cr ₂ O ₃ sobre arenado [5].	26
Figura 1.3 Micrografías SEM a 500X: Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram 23075 a) Preparación con granalla b) Preparación con arena c) Preparación con pulidora [3]	29
Figura 1.4 Difracción de rayos X para los patrones de WC-CoCr y Cr ₃ C ₂ -20 (NiCr) a) y b) Polvos de recubrimiento. c) y d) recubrimientos de HVOF y e) y f) Recubrimiento DS...	30
Figura 1.5 Micrografía. SEM donde se observan marcas de desgaste en WC-10 Co-4Cr recubiertos luego de la prueba de abrasión con partículas de alúmina:(a) W1; (b) W2; (c) W3; (d) W4. [12].....	31
Figura 1.6 Máquina para abrasión a dos y tres cuerpos [17].	33
Figura 1.7 Difracción de rayos X de WC proyectado mediante HVOF.....	35
Figura 1.8 Cambio en el número de ciclos a la fractura como una función de la tensión máxima alternada para el sustrato de acero SAE 1045 con y sin revestimiento.....	40
Figura 2.1 Splat de una bala de plomo [20].....	45
Figura 2.2 Evolución de la proyección térmica desde (A) según patente alemana 24460 (1882) hasta pasar por (B) y (C) [20].....	46
Figura 2.3 Cronología de la evolución térmica de pulverización, equipos, procesos y materiales. [15]	47
Figura 2.4 Proyección térmica en proceso.	50
Figura 2.5 Proceso de proyección térmica [31]	51
Figura 2.6 Modelo de sistema genérico de termorrociado [32]	51
Figura 2.7 Esquema general proceso de consolidación de polvos a través de la proyección térmica [35].	53
Figura 2.8 Procesos térmicos de pulverización [21][32].	57
Figura 2.9 Pistola alimentada con polvos para proyección térmica [32]	59
Figura 2.10 Pistola alimentada con alambre para proyección térmica [32].....	60
Figura 2.11 Esquema del proceso de proyección térmica por flama con polvos [32] [50]	62
Figura 2.12 Pistola de proyección térmica por flama con aspersion de polvos [54]	64
Figura 2.13 Mecanismos de desgaste, a) Abrasivo, b) Adhesivo, c) y d) Fatiga superficial.[70].....	74
Figura 2.14 Ejemplo de desgaste adhesivo sobre una superficie plana [71]	75
Figura 2.15 Desgaste abrasivo de dos cuerpos [71].....	76

Figura 2.16 Desgaste abrasivo a tres cuerpos [72]..... 77

Figura 2.17 Geometría de la huella dejada para calcular el volumen perdido [83, 88] 83

Figura 2.18 Diagrama esquemático prueba pin on disk según la norma ASTM G99 – 04 [91]..... 85

Figura 2.19 Esquema de la prueba de rayado [101] 91

Figura 2.20 Formas de las posibles fallas en la prueba de rayado transversal y área de cono [105] 92

Figura 2.21 Durómetro Rockwell digital CV600MB [109] 93

Figura 2.22 Comparación entre las microindentaciones en grados Knoop (a) y Vickers (b) [110]..... 94

Figura 2.23 Esquema de difracción de rayos X o reflexión de Bragg. [113] 96

Figura 2.24 Principio de la fluorescencia de rayos X [116] 97

Figura 2.25 a) Esquema de funcionamiento del microscopio electrónico de barrido, b) Señal convertida [119][120]...... 98

Figura 2.26 Esquema del funcionamiento del microscopio láser confocal [121]..... 101

Figura 3.1 Soplete superjet Eutalloy [54] 104

Figura 3.2 Probetas luego del granallado 107

Figura 3.3 Maquina de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65-04 109

Figura 4.1 Difractogramas de Nitec a diferentes temperaturas. 113

Figura 4.2 Difractogramas de Nitec posiciones y direcciones de fase 114

Figura 4.3 Morfología del polvo de aporte Nitec a 1000X 115

Figura 4.4 Sustrato de fundición con recubrimiento de Nitec a 500X..... 115

Figura 4.5 Sección transversal del sustrato de fundición con recubrimiento de Nitec a 500X..... 116

Figura 4.6 Microscopía Confocal de la superficie Nitec a) N3, b) N4 y c) N5. 117

Figura 4.7 Rugosidad media de la superficie Nitec 117

Figura 4.8 Patrones de difracción de Rayos X en Metaceram. 119

Figura 4.9 Picos de difracción de los patrones de difracción de Rayos X en Metaceram 120

Figura 4.10 Morfología del polvo de aporte Metaceram a 300X..... 121

Figura 4.11 Morfología del recubrimiento de Metaceram sobre el sustrato de fundición gris a 150X. 122

Figura 4.12 Recubrimiento de Metaceram con partículas a) semifundidas de Ni 1500x, b) sin fundir de Ni 1000x y c) sin fundir de WC 1800x 122

Figura 4.13 Sección transversal del recubrimiento de Metaceram 23075, a) recubrimiento, b) zona de interfaz y c) sustrato fundición. 123

Figura 4.14 Microscopía Confocal de la superficie Metaceram) M3, b) M4 y c) M5 124

Figura 4.15 Rugosidad media de la superficie Metaceram. 124

Figura 4.16 Promedios de dureza en grados Knoop recubrimiento Nitec. 126

Figura 4.17 Promedios de dureza en grados Knoop vs. Promedios de rugosidad en micrómetros para el recubrimiento Nitec. 126

Figura 4.18 Promedios microdureza en grados Knoop contra desgaste en gramos recubrimiento Nitec. 127

Figura 4.19 Promedios de desgaste en gramos recubrimiento Nitec. 128

Figura 4.20 Espesores del recubrimiento a)N3, b)N4 y c)N5.....	129
Figura 4.21 Valores promedio de los espesores del recubrimiento Nitec en micrómetros vs microdureza en grados Knoop.....	130
Figura 4.22 Área del cono en función de la carga aplicada.....	132
Figura 4.23 Área del cono en función de la carga aplicada promedio y para cada una de las temperaturas del sustrato antes de la deposición.....	132
Figura 4.24 Cono en N4 con carga de 15N.....	133
Figura 4.25 Micrografías de la prueba de rayado, partículas de desgaste e interfaz.....	134
Figura 4.26 Coeficientes de fricción vs tiempo para la prueba de pin on disk.....	135
Figura 4.27 Promedios de coeficiente de fricción en el Sustrato, N3, N4 y N5 respectivamente para la prueba de pin on disk.....	135
Figura 4.28 Microscopía confocal del desgaste abrasivo a tres cuerpos del recubrimiento Nitec.....	136
Figura 4.29 Promedio de la rugosidad media y promedio desgaste vs. Material.....	137
Figura 4.30 Microscopía Confocal de la superficie Nitec con huella de pin on disk.....	137
Figura 4.31 Promedios de rugosidad media pin on disk y muestra en cada probeta de Nitec y sustrato.....	138
Figura 4.32 Promedios de dureza en grados Knoop vs Recubrimiento.....	139
Figura 4.33 Promedios de dureza en grados Knoop y rugosidad del recubrimiento Metaceram.....	140
Figura 4.34 Promedios de dureza en grados Knoop vs promedio desgaste en gramos.....	141
Figura 4.35 Promedios de desgaste en gramos recubrimiento Metaceram vs Dureza ..	142
Figura 4.36 Espesores del recubrimiento a)M3, b)M4 y c)M5.....	143
Figura 4.37 Promedio de los espesores de Metaceram en micrómetros.....	144
Figura 4.38 Área del cono en función de la carga aplicada.....	145
Figura 4.39 Área del cono en M3 con carga de 25N.....	146
Figura 4.40 Micrografías de la prueba de rayado, partículas de desgaste e interfaz.....	147
Figura 4.41 Promedios de coeficiente de fricción en M3, M4 y M5 respectivamente para la prueba de pin on disk.....	148
Figura 4.42 Promedios de coeficiente de fricción en M3, M4 y M5 respectivamente para la prueba de pin on disk.....	149
Figura 4.43 Microscopía confocal del recubrimiento metaceram después del ensayo de abrasión.....	150
Figura 4.44 Microscopía Confocal de la superficie Metaceram sobre la huella de pin on disk.....	150
Figura 4.45 Promedio de la rugosidad media y promedio desgaste vs. Material.....	151
Figura 4.46 Piezas para recuperación mediante proyección térmica por llama.....	153
Figura 4.47 Tapa del motor luego del granallado.....	154
Figura 4.48 Polvos utilizados para la proyección térmica.....	155
Figura 4.49 Levantamiento de planos para la tapa del motor.....	156

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Las composiciones de los polvos, resultados de difracción de rayos X y γ -ratio de diferentes recubrimientos de FeAl	34
Tabla 2 Fecha evolutivas Eutectic Castolin®. [31]	48
Tabla 3 Métodos de generación de procesos de proyección [21].	58
Tabla 4 Temperaturas de fuentes de calor. [32][51]	61
Tabla 5 Propiedades de diferentes polvos aplicados por la técnica proyección térmica por llama [60][61].....	67
Tabla 6 Características del recubrimiento Nitec [3][8].....	69
Tabla 7 Características del recubrimiento Metaceram 23075 [3][9]	70
Tabla 8 Algunas ventajas y limitaciones de la microscopía electrónica de barrido [111].	99
Tabla 9 Propiedades del polvo Nitec 10224	104
Tabla 10 Propiedades del polvo Metaceram 23075.....	105
Tabla 11 Niveles de recubrimientos.....	108
Tabla 12 Resultados de análisis químico del sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.....	112
Tabla 13 Resultados de análisis químico del recubrimiento de Nitec depositado sobre el sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.....	112
Tabla 14 Resultados de análisis químico del recubrimiento de Metaceram depositado sobre el sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.	118
Tabla 15 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Nitec 10224.	131
Tabla 16 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Nitec 10224	131
Tabla 17 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Metaceram 23075.....	145
Tabla 18 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Metaceram 23075.....	145

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint \frac{dA}{dx dy}$
a	Coeficiente	1	Tabla 3-1
c	Contenido de carbono	1	$\frac{V_{CaO}}{V_{CaCO_3}}$
c	Concentración de la cantidad de materia	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{n}{V}$
D	Diámetro	m	
L	Longitud	m	DF
T	Temperatura	K	DF
t	tiempo	s	DF
V	Volumen	m^3	$\int \frac{dV}{dx dy dz}$
v	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$\frac{dr}{dt}, r \frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Grado de formación del componente i	1	$(W_{F,waf})(A_{BET})$
χ_l	Wandhaufreibwinkel (Stahlblech)	1	$\frac{V_{mj}}{mbm \phi}$
ϵ	Porosidad de la partícula	1	$1 - \frac{V_s}{V_t}$
θ	mittlere Bettneigungswinkel (Stürzen)	1	Figura 3-1
β	Ángulo de inclinación	1	Figura 4-1
$ 1$	Velocidad de calentamiento	$\frac{1}{s}$	Figura 4-1
τ	Tiempo adimensional	1	Ec. 2.6
W_V	Flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$	Ec. 2.

Superíndices

Superíndice Término

n Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura Término

XRF

FRX Fluorescencia de rayos X

XRD

DRX Difracción de rayos X

SEM

MEB Microscopía electrónica de barrido

COF Coeficiente de fricción

Introducción

En Colombia tenemos la necesidad de ser competitivos a nivel internacional desarrollando nuevas tecnologías, tanto en las áreas de ingeniería, como en el área de materiales en ingeniería. En la industria naval nacional, los requerimientos de resistencia al desgaste son considerablemente elevados, debido a las condiciones adversas del medio donde cumplen su función todos los componentes navieros. Cuando estos componentes han operado durante un período de tiempo prolongado, presentan signos de deterioro particularmente en su superficie, que pueden afectar la funcionalidad del elemento o de su conjunto. Por lo tanto es necesario realizar estudios de desgaste para comprobar experimentalmente que los productos adicionados mediante proyección térmica están lo suficientemente adheridos a la superficie de trabajo.

La industria metalmecánica está enfrentada diariamente a problemas de desgaste de herramientas y máquinas utilizadas en sus diferentes procesos. Estos problemas se ven reflejados directamente en la vida útil de los componentes y en pérdidas de producción por fallas prematuras.

Actualmente en la industria naval estos inconvenientes son solucionados depositando recubrimientos duros de Metaceram 23075 (Ni + 40%WC/Co) sobre las superficies navías mediante proyección térmica. De esta forma se mejoran las propiedades mecánicas tales como la dureza superficial, la tenacidad y la resistencia al desgaste de los materiales recubiertos. Sin embargo realizar éste tipo de recubrimientos exige equipos de alto costo y personal experto en soldadura, lo que aumenta el costo del proceso.

La técnica *Thermal Spray* propuesta en este trabajo aparece como una alternativa viable para producir recubrimientos más económicos que cumplan con las necesidades

requeridas por la industria. Sin embargo, la técnica es ya conocida en Colombia aunque se han realizado pocos desarrollos tecnológicos e investigativos (Navalmente).

Ahora bien, en los laboratorios de soldadura de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá se ha logrado producir de forma satisfactoria recubrimientos de Metaceram 23075 (Ni + 40%WC/Co) sobre sustratos de hierro y bronce [1] . Sin embargo, es posible mejorar las propiedades de estos materiales cambiando las temperaturas de proyección sobre los sustratos y el espesor de capa. Se espera que la generación de capas por proyección térmica sobre sustratos de hierro fundido cambiando la temperatura de proyección, genere mejores propiedades que las que existen actualmente con temperaturas de proyección y espesores constantes.

En Colombia tenemos la necesidad de ser competitivos a nivel internacional desarrollando nuevas tecnologías, tanto en las áreas de ingeniería, como en el área de materiales en ingeniería. Estudios indican que la adición de capas de Metalceram 23075 (Ni + 40%WC/Co) por medio de la técnica de proyección térmica aumenta la resistencia a la corrosión y al desgaste [1] [2], por lo tanto es necesario realizar estudios de desgaste para comprobar estos resultados experimentalmente.

Los recubrimientos producidos por esta técnica se caracterizan por su estructura laminar, densidad de capa y presencia de poros, y presentan buenas condiciones de resistencia al desgaste por contacto [1]. La proyección térmica por llama se considera un método versátil y eficiente, que proporciona a las piezas mayor resistencia y durabilidad, y que puede ser usado no sólo como una tarea de mantenimiento, sino que también pueda utilizarse de forma preventiva en la manufactura de componentes. [3]

Los recubrimientos obtenidos se han caracterizado en su composición por medio de análisis de por difracción de rayos X Y Auger, en su microestructura por medio de microscopía electrónica de barrido y en su resistencia al desgaste, por medio de técnicas de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 [4] que han permitido evidenciar no sólo el efecto de la preparación de la superficie del sustrato, sino también el efecto de otras condiciones del proceso, como el estado de los sustratos, el precalentamiento de la

superficie de deposición, el estado de la llama y el post tratamiento de las capas depositadas.

Estas pruebas abrasivas vienen acompañadas con una caracterización mediante microscopía laser confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM).

La industria metalmecánica está enfrentada diariamente a problemas de desgaste de herramientas y máquinas utilizadas en sus diferentes procesos. Estos problemas se ven reflejados directamente en la vida útil de los componentes y en pérdidas de producción por fallas prematuras.

Actualmente en la industria estos inconvenientes son solucionados depositando recubrimientos duros sobre los aceros. De esta forma se mejoran las propiedades mecánicas tales como la dureza superficial, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión de los materiales recubiertos. Sin embargo realizar éste tipo de recubrimientos exige equipos de alto vacío que aumentan el costo del proceso.

La técnica de Proyección Térmica por Llama (Thermal Spray) propuesta en este trabajo aparece como una alternativa viable para producir recubrimientos más económicos que cumplan con las necesidades requeridas por la industria naval y la industria en general. Sin embargo, la técnica ya es conocida en Colombia y se han realizado algunos desarrollos tecnológicos e investigativos, En la Universidad Nacional de Colombia se han logrado recubrimientos exitosos de Nitec 10224 y Metaceram 23075 [3] [2][7].

Objetivo General

Estudiar la influencia de la temperatura de depósito sobre la resistencia al desgaste de recubrimientos comerciales Nitec 10224 y Metaceram 23075 depositados sobre sustratos de fundición con la técnica de proyección térmica por llama.

Objetivos específicos

- Producir de manera óptima los recubrimientos comerciales Nitec 10224 y Metaceram 23075, sobre sustratos de fundición gris, variando la temperatura de depósito en el proceso de proyección térmica con llama.
- Caracterizar la morfología y microestructura de los recubrimientos producidos por medio de técnicas de microscopía electrónica, difracción de rayos X y microscopía laser confocal y fluorescencia de rayos X.
- Evaluar la resistencia al desgaste y la adherencia de los recubrimientos depositados por proyección térmica por llama con pruebas de desgaste abrasivo de tres cuerpos, *pin on disk* y *rayado*.

1. Antecedentes

1.1 Antecedentes Nacionales:

A nivel nacional se encontraron investigaciones relacionadas con la técnica de proyección térmica por llama, en la mayoría de los casos con polvos a base de níquel y carburos de tungsteno. Con respecto a la influencia de la temperatura en la deposición del recubrimiento no se encontraron trabajos en los cuales se estudien las propiedades con respecto a ésta variación; sin embargo si se encontraron algunas referencias que estudiaron la resistencia a la corrosión y al desgaste.

1.1.1 Proyección térmica Metaceram y Proxon

Dimaté Laura [5] estudió la resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama, donde se lograron depositar recubrimientos por medio de la técnica de polvos a la llama. Se estableció que el mejor método de preparación de la superficie para cualquiera de los dos recubrimientos es granallado con alúmina ya que proporciona mayor rugosidad al recubrimiento, aumentando su adherencia y así haciendo más difícil la delaminación del recubrimiento después de que el electrolito penetra el recubrimiento. Llegó a la conclusión de que el recubrimiento de Cr_2O_3 tiene un mejor comportamiento frente a la corrosión que el recubrimiento de bronce, presentando valores más nobles de E_{corr} y por la superficie pasiva formada, aunque al momento de ser aplicado se deben

tener en cuenta otros variables como a que esfuerzos va a estar sometida la pieza a recubrir.

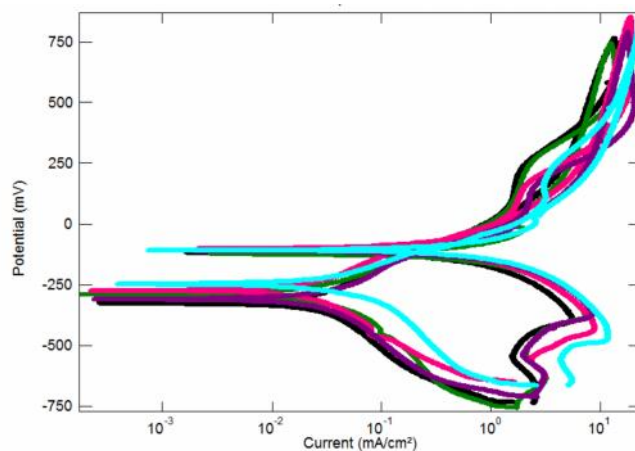


Figura 1.1 Curva de voltamperometría cíclica del recubrimiento óxido de cromo con capa base, preparado con granalla con alúmina, arenado y pulidora [5].

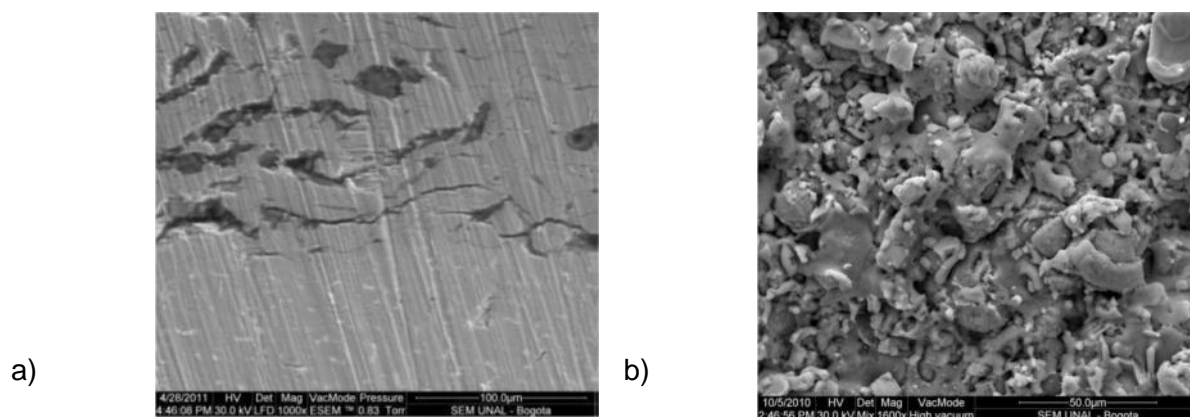


Figura 1.2 a) Micrografía SEM de la sección transversal del recubrimiento de bronce electrones retodispersados a 1000X b) Recubrimiento Cr₂O₃ sobre arenado [5].

1.1.2 Desgaste por adhesión, abrasión y corrosión

Mediante un estado del arte del análisis de falla de piezas de la industria naval que pueden ser recuperadas mediante la técnica de proyección térmica, Lucena [6] determinó que empresas a nivel mundial ofrecen las distintas técnicas de proyección térmica, junto con su respectiva sustentación teórica. Se estudiaron los tipos de fallas encontradas en piezas de motor y llegó a la conclusión de que en la industria naval es muy notoria la existencia de piezas que han sufrido procesos de desgaste, tanto por adhesión como por abrasión y corrosión.

1.1.3 Resistencia al desgaste

En la sede Medellín de la Universidad Nacional realizaron una evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera. J. Gutiérrez y colaboradores, evaluaron la resistencia al desgaste abrasivo de dos recubrimientos duros de alto W y alto Cr, usados comúnmente en la industria minera, aplicados mediante soldadura SMAW y OFW.

Establecieron que la dureza no es un parámetro concluyente al momento de evaluar la resistencia al desgaste abrasivo de los materiales estudiados, ya que variaciones mínimas en la dureza del material llevaron a cambios muy grandes en pérdidas de masa por abrasión usando ensayo normalizado de abrasión a tres cuerpos mediante la Norma ASTM G 65.

1.1.4 Resistencia al desgaste

G. Martínez, Olaya J. y colaboradores [3], estudiaron la resistencia a la corrosión de recubrimientos Nitec y Metaceram 23075 depositados mediante la técnica de proyección térmica por llama y presentaron una alternativa económica además de competitiva para la reparación de componentes en la industria naval mediante la técnica mencionada. En la Tabla 1.2. se presentan los sustratos usados con sus respectivos recubrimientos y pruebas de caracterización a las que se sometieron. Realizaron un estudio sobre cuatro sustratos diferentes; fundición gris, Acero AISI 4340, Bronce fosforado y Acero AISI 1020 para determinar su desempeño y posteriormente ser aplicado en la industria naval.

Polvos a base de Níquel y Tungsteno (Nitec 10224 y Metaceram 23075) se depositaron en diferentes proporciones sobre un sustrato de fundición gris usando la técnica de proyección por llama. También usaron un sistema de proyección térmica con llama en frío y depositaron alúmina (Al_2O_3) sobre acero AISI 4340 y Cr_2O_3 aplicado sobre un sustrato de bronce fosforado; además se usó una capa de liga $Ni + 11 Al, Mo$ en ambos casos para mejorar la adherencia. La caracterización por desgaste se hizo bajo la norma ASTM G65 [4], se utilizó una carga de 130 N, aplicada durante 1 minuto, con flujo de arena de 300-400 g/min y la rueda de caucho girando a 200 rpm.

Las micrografías de la superficie de los recubrimientos cerámicos se presentan en la Figura 1.3 donde se aprecia la formación del recubrimiento con partículas fundidas y semifundidas en forma de láminas superpuestas. Además se evidencian zonas más claras que corresponden a la capa base de liga como, la presencia de poros como pequeños espacios entre las láminas, y la precipitación de óxidos como manchas oscuras y pequeñas. [21]

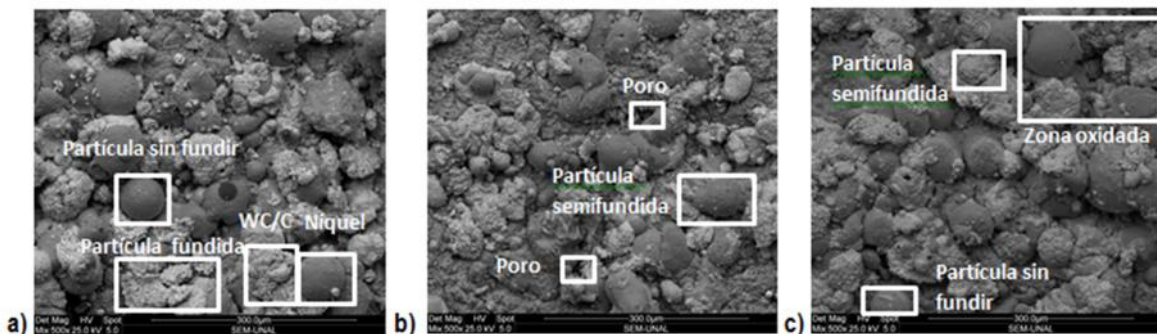


Figura 1.3 Micrografías SEM a 500X: Sustrato bronce, Recubrimiento Metaceram 23075 a) Preparación con granalla b) Preparación con arena c) Preparación con pulidora [3]

Así mismo concluyeron que los recubrimientos utilizados para el desarrollo de esta investigación, mostraron mejoras en las propiedades de resistencia al desgaste abrasivo, a la corrosión y barrera térmica sobre los sustratos en que fueron depositados; excepto el recubrimiento Al_2O_3 que al ser un recubrimiento cerámico, son aleaciones de cuidadosa deposición para finalmente poder obtener las propiedades deseadas.

Además, ya que fueron depositados con la técnica de proyección en frío, sus propiedades no llegan a parecerse a las de los recubrimientos base níquel, depositados con proyección por llama en caliente (Nitec y Metaceram). Sin embargo, el recubrimiento de óxido de cromo, mostró buenos resultados y mejoras significativas en su comportamiento en condiciones agresivas como medios corrosivos, aun al ser depositado sobre un sustrato de bronce, material de muy buenas condiciones para la industria naval.

El recubrimiento Cr_2O_3 presentó buenas características de resistencia a la corrosión y al desgaste, mejorando algunas de las características del sustrato de bronce. De la misma forma fue apreciado en el ensayo de barrera térmica, donde los óxidos formados sobre la superficie le permitieron una buena estabilidad mecánica a altas temperaturas.

En este mismo recubrimiento a base de Cr_2O_3 , se lograron valores de dureza cercanos a 800 HV que corresponden a los recomendados por el proveedor del material en la hoja de datos [16]. Finalmente se recomienda que sean depositados materiales con punto de

fusión similar y que la superficie sea preparada mediante procesos de cambio de rugosidad superficial como por ejemplo la granalla; de ésta forma el perfil de anclaje mejora notablemente lo que ayuda en parte al material para que tenga una buena resistencia a la corrosión.

1.2 Antecedentes Internacionales:

1.2.1 Caracterización de la porosidad

AKHRAMANA [11], Estudio los recubrimientos obtenidos por proyección térmica caracterizados por la adherencia al sustrato, la porosidad y la cantidad de óxidos presentes. Uso técnicas de caracterización como la Difracción de rayos X (XRD) usando un difractómetro con radiación Cu-Ka el cual operaron a 40 KV y 25 mA obteniendo los patrones de la Figura 1.4. Además realizó también pruebas de microdureza usando un indentador tipo Vickers con una carga de 300gr, pruebas de rayado mediante pin on disk y en ambos casos las probetas pulidas con una rugosidad menor a 0,15 μm .

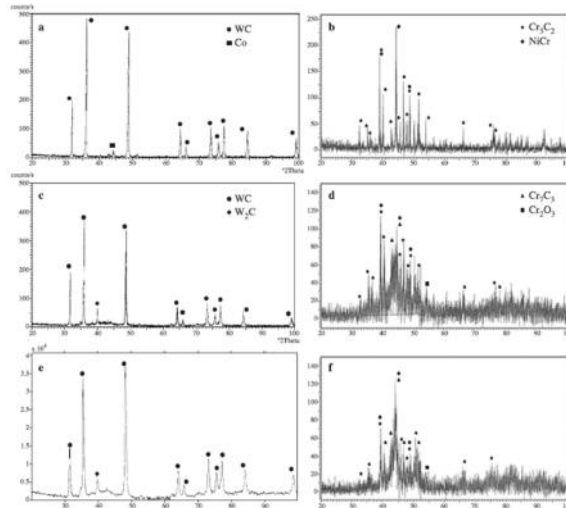


Figura 1.4 Difracción de rayos X para los patrones de WC-CoCr y $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20}$ (NiCr) a) y b) Polvos de recubrimiento. c) y d) recubrimientos de HVOF y e) y f) Recubrimiento DS.

Se llegó a la conclusión de que el recubrimiento de WC-10Co-4Cr tenía mejor resistencia al desgaste comparado con el recubrimiento de Cr₃C₂-20 (NiCr), y que posiblemente se debe a la alta dureza de las partículas de WC y mejores propiedades en la interface del material aglutinante CoCr. También se concluyó que el espesor de la fractura que dejó la huella de indentación del recubrimiento WC-CoCr fue ligeramente mejor que para el Cr₃C₂-20 (NiCr), lo que quizá causó en principio que mejorara la resistencia al desgaste.

Finalmente los recubrimientos depositados mediante el proceso de DS tuvieron una ligera resistencia al desgaste en comparación con el proceso de HVOF, debido posiblemente a la alta densidad de los esfuerzos residuales de compresión inducidos sobre el recubrimiento DS. Entonces ambos recubrimientos de proyección térmica tuvieron valores superiores de rendimiento en cuanto a la resistencia al desgaste en comparación con los recubrimientos duros a base de Cromo.

1.2.2 Resistencia a la abrasión

ANCHAN KUMARI [12], estudió la microestructura de los depositos de capas de Carburo de Tungsteno (WC), como se aprecia en la Figura 1.5.; depositadas con la técnica de proyección térmica luego de una prueba de desgaste ASTM G65 [4], concluyendo que todas las microestructuras estudiadas tienen poca porosidad y gracias a esto tienen muy buena resistencia a la abrasión.

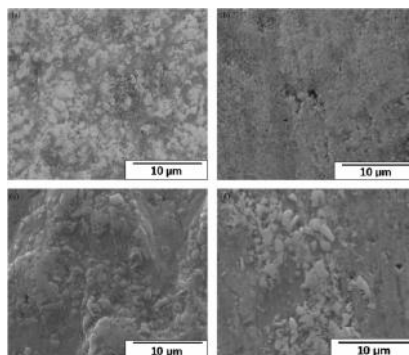


Figura 1.5 Micrografía. SEM donde se observan marcas de desgaste en WC-10 Co-4Cr recubiertos luego de la prueba de abrasión con partículas de alumina:(a) W1; (b) W2; (c) W3; (d) W4. [12]

1.2.3 Resistencia a la corrosión.

Min-Su HAN[13], estudió los efectos que tiene el espesor de los recubrimientos de Aluminio STS 304 mediante la técnica de proyección Térmica, concluyendo que si el metal base es expuesto a un ambiente con propiedades salinas como lo es el océano, es posible que las características del ánodo de sacrificio lo protejan de la corrosión típica de éste; y que el cátodo refleja un potencial electroquímico alto mientras que la capa que operó con el ánodo la cual fue depositada por proyección térmica presentaba bajo potencial electroquímico desde la superficie hasta la sección compuesta. Los resultados del experimento electroquímico mostraron que las capas con altos espesores presentaban buena resistencia a la corrosión.

1.2.4 Abrasión a tres cuerpos

Fang L., Zhou Q. y colaboradores realizaron un estudio experimental de la simulación del desgaste cortante de abrasión a tres cuerpos [17]. El proceso de desgaste se realizó mediante la máquina de la Figura 1.6. para abrasión a dos y tres cuerpos. Realizaron estudios de dureza y volumen perdido en Cobre, Hierro y Acero con diferentes composiciones y densidades; además se compararon los resultados de la abrasión a tres cuerpos con la pérdida de masa y volumen de las pruebas en pin on disk. Llegaron a la conclusión de que la distancia de recorrido es directamente dependiente de la función de la dureza de los materiales de ensayo una vez que otras condiciones de ensayo tribológico sean definidas.

También propusieron en el artículo una simulación de la distancia recorrida en la prueba de abrasión en función de la dureza del material. Y finalmente concluyeron que en las pruebas simuladas de abrasión en función a la dureza se pueden apreciar los picos característicos del desgaste cortante existente lo que podría explicar la curva en forma de S de desgaste relacionada con la dureza en el ensayo de desgaste a tres cuerpos.

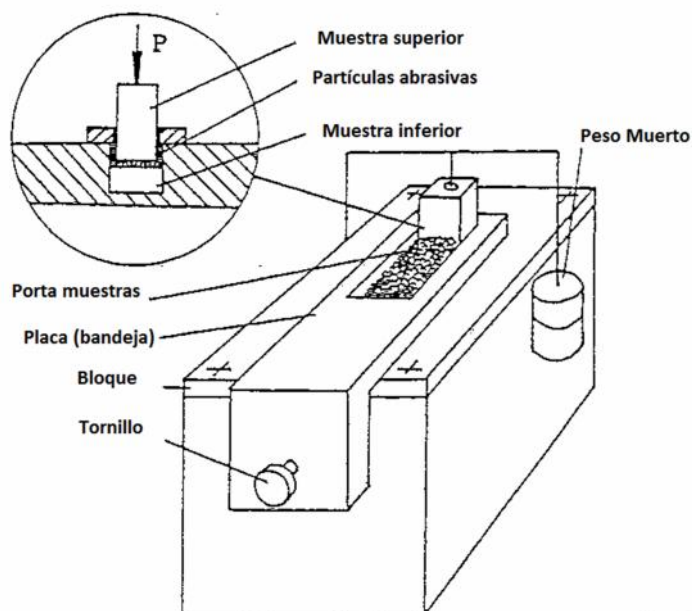


Figura 1.6 Máquina para abrasión a dos y tres cuerpos [17].

1.2.5 Erosión y desgaste abrasivo

Y. Wang y M. Yan estudiaron el efecto del CeO_2 en la erosión y el desgaste abrasivo sobre las propiedades de las capas intermetálicas de la aleación FeAl mediante proyección térmica HVOF [124]. Ellos observaron que los recubrimientos intermetálicos de FeAl que contenían CeO_2 se presentaron con menos grietas, menos porosidad y una alta dureza a comparación de los recubrimientos de FeAl únicamente. Los recubrimientos intermetálicos de FeAl que contenían CeO_2 exhibieron un incremento significativo en la resistencia a la erosión y la arbasión en comparación con los revestimientos de FeAl puros. También se discutieron los posibles mecanismos relacionados con el mejoramiento de la microestructura, la erosión y la resistencia a la abrasión de los recubrimientos intermetálicos FeAl que contenían CeO_2 .

Para la composición de los recubrimientos según los resultados de la difracción de rayos X de diferentes recubrimientos de FeAl, se caracterizaron mediante un código sencillo según la Tabla 1.

Tabla 1 Las composiciones de los polvos, resultados de difracción de rayos X y - ratio de diferentes recubrimientos de FeAl

Código	FeAl	2E	5E	8E
Composición del recubrimiento	FeAl	FeAl + 2%CeO ₂	FeAl + 5%CeO ₂	FeAl + 8%CeO ₂
Resultado de XRD	FeAl, FeO	FeO, FeAl, FeO, CeO ₂ (little)	FeAl, CeO ₂ , FeO (little)	FeAl, CeO ₂ , FeO (little)
-Ratio	29.374	31.01	29.819	28.6

Se llegó a la conclusión de que los recubrimientos intermetálicos de FeAl que contienen CeO₂ exhibieron aumento significativo en su resistencia a la erosión y la abrasión en comparación con la de los revestimientos de FeAl puros. El recubrimiento de FeAl que contenía 2% en peso CeO₂ tenía la mayor dureza, alta elasticidad, alta resistencia a la erosión y más alta resistencia al desgaste abrasivo entre los cuatro recubrimientos intermetálicos de FeAl de los recubrimientos ensayados FeAl, 2E, 5E y 8E.

1.2.6 Desgaste abrasivo WC-CoCr depositado por HVOF.

J.K.N. Murthy y colaboradores estudiaron revestimientos de carburo de Tungsteno y Cobalto – Cromo pulverizado mediante proyección térmica para evaluar la resistencia al desgaste. Estos recubrimientos se depositaron por procesos de alta velocidad de oxicomcombustible (HVOF) y la detonación mediante pistola por rociado (DS). Las pruebas de abrasión se realizaron utilizando abrasión a tres cuerpos con banco de pruebas de rueda de goma sólida de partículas usando granos de sílice como medio abrasivo.

Se usaron los resultados de las difracciones de rayos X (DRX) analizadas en el artículo como se aprecia en la Figura 1.7 para compararlas con las del recubrimiento a base de carburo de Tungsteno Metaceram.

Concluyeron que los recubrimientos de WC-10CO-4Cr tiene una mejor resistencia al desgaste abrasivo en comparación con los recubrimientos de Cr₃C₂-20 (NiCr)

posiblemente debido a la dureza más alta de las partículas de WC y mejores propiedades de la matriz del material aglutinante de CoCr. La resistencia a la fractura del recubrimiento WC-CoCr fue ligeramente mejor que la de Cr₃C₂-20 (NiCr), que también mejoró la resistencia al desgaste en el primero. Los revestimientos depositados por el proceso de DS tenían ligeramente una mejor resistencia al desgaste en comparación con el proceso HVOF, posiblemente debido a la mayor densidad y la compresión de tensiones residuales inducidas en el recubrimiento DS. Los revestimientos rociados térmicamente de WC tenían superior resistencia al desgaste en comparación con el recubrimiento de cromo duro.

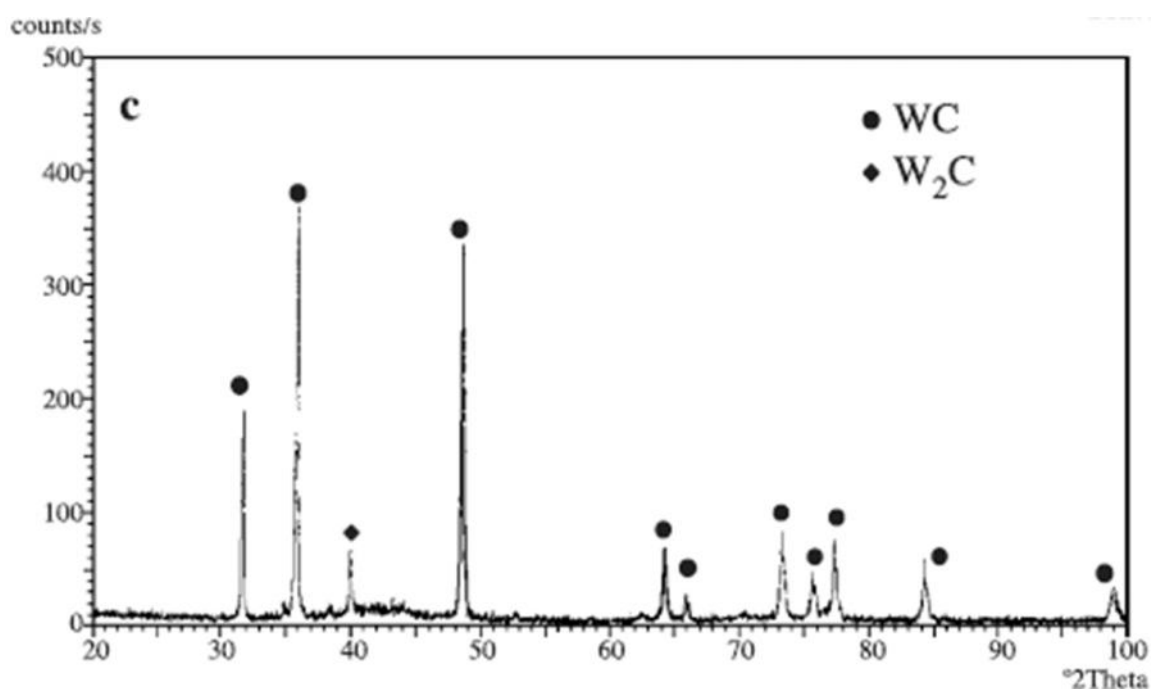


Figura 1.7 Difracción de rayos X de WC proyectado mediante HVOF.

Los resultados mostraron que los recubrimientos proyectados mediante DS se ejecuta un poco mejor que los recubrimientos proyectados por HVOF, posiblemente debido a las altas tensiones de compresión residuales inducidas. Concluyeron también que los revestimientos a base de WC tienen mayor resistencia al desgaste en comparación con el recubrimiento a base de Cr₃C₂. Además, el los proyectados térmicamente a base de carburo tenían una excelente resistencia al desgaste con respecto a los revestimientos de cromo duro.

1.2.7 Investigación y aplicaciones intermetálica por proyección térmica

Nuria Cinca y colaboradores ofrecen una visión general de las investigaciones que se han hecho más recientemente en recubrimientos intermetálicos, para poner de relieve su importancia para varias aplicaciones en muchas áreas, y para examinar los temas para futuras investigaciones [126]. El tema principal es la aplicación de compuestos intermetálicos como revestimientos de pulverización térmica. Esto permitió que se discutiera si eran prometedores como un medio de superficie para los materiales que trabajan a altas temperaturas. En la clasificación de los intermetálicos incluyen materiales como Hierro, Níquel, y aluminuros de titanio, así como siliciuros de metales de transición. Los Aluminuros de níquel han sido importantes en las cuestiones relacionadas con las capas de unión, se trayectoria se investigación y se revisó.

Por otra parte, como el sistema Fe-Al también se ha estudiado en términos de procesamiento de pulverización térmica, sus buenas características también se evaluaron. La tercera parte de los recubrimientos intermetálicos del artículo se centró en el NiTi, que parece no estar incluido en las clasificaciones generales de los intermetálicos compuestos, pero que merece ser mencionado, principalmente debido a su efecto de memoria de forma y propiedades de biocompatibilidad.

Otras aleaciones intermetálicas han sido investigado en otras investigaciones, pero no se discuten en el trabajo e Cinca, como por ejemplo aleaciones nasadas en TiAl y MoSi. Una buena referencia para su estudio se puede encontrar en las obras de Yamaguchi y colaboradores [127] y Vasudevan, Petrovic y colaboradores [128], por nombrar algunos.

Se encontró en la investigación que algunas de las características de la proyección térmica son las mejoras en la fluencia, resistencia a la fatiga y el desgaste que parecen ser una de las principales áreas de investigación, especialmente los destinados a trabajar con propiedades de temperatura ambiente. Estudios específicos que implican colaboración interdisciplinaria son cada vez más populares, como expertos buscan aplicaciones en áreas como la biomedicina la ingeniería, la nanociencia y la tecnología de la información. Especialmente para la tecnología de proyección térmica, hay varios

aspectos importantes de la aplicación e capas intermetálicas, ya que han sido investigadas con el fin de entender mejor el comportamiento de recubrimientos a temperatura ambiente y a altas temperaturas. La resistencia a la oxidación y al desgaste son características importantes que deben existir en el estudio de los recubrimientos intermetálicos, ya que para ser útiles en aplicaciones y procesos de alta temperatura es necesario entender las reacciones que existen de estos fenómenos.

Por lo tanto, según la investigación de Cinca es convenientemente utilizar recubrimientos con un alto contenido de Al, Cr o Si. Uno de los sistemas intermetálicos ampliamente utilizados para la proyección térmica es el NiAl, los científicos continúan estudiando para obtener mejores resultados en los entornos de trabajo nuevos o condiciones de servicio extremas. En esta perspectiva, los recubrimientos de FeAl y TiAl parecen ser buenas opciones aunque pocos estudios relacionados con éstos recubrimientos se han hecho para el TiAl, quizá se debe al alto precio del Titanio.

Teniendo en cuenta que la mejora de las propiedades mecánicas que se muestran ocurren directa y proporcionalmente a la reducción del tamaño de grano, los próximos estudios deberían explorar estructuras de grano nanométrico obtenidos por varias técnicas de proyección térmica. Mediante HVOF se ha estudiado bastante el recubrimiento a base de FeAl pero en la técnica de plasma, por ejemplo, o pulverizadora en frío, no. Por último, valdría la pena investigar nitinol, cuya aplicaciones inmediatas están relacionadas con la medicina. Por este propósito, sus propiedades superficiales son de particular importancia, especialmente la cuestión de si es biocompatible o no.

1.2.8 Caracterización de recubrimientos por proyección térmica mediante pruebas de rayado

La empresa CSM instruments y colaboradores investigaron nuevos métodos para realizar pruebas donde se caractericen propiedades mecánicas como la prueba de rayado y dureza, de los recubrimientos aplicados mediante proyección térmica [129]. La parte I de la obra presenta los resultados de la prueba de indentación con carga baja y las pruebas de rayado en recubrimientos HVOF. En la parte II se discuten los resultados tanto en

indentación de baja y alta carga como de indentación cíclica en HVOF y recubrimientos pulverizados por plasma. También mencionan en su investigación resultados seleccionados de indentación con alta carga en recubrimientos HVOF.

El trabajo se aplicó sobre nuevas aplicaciones de la instrumentación usada para indentación y pruebas de rayado, métodos para investigación de propiedades microscópicas y macroscópicas de los recubrimientos por proyección térmica. Estos métodos les dieron una nueva visión y entendimiento acerca del entendimiento de las propiedades mecánicas a micro y nano escala. Midieron y observaron la evolución de la dureza y se confirmó que a cargas muy bajas se apreciaban las propiedades de granos o splats individualmente, mientras que si se incrementaba la carga se observó la influencia de una matriz metálica más suave y dúctil.

Se uso un nuevo parámetro para la caracterización de los recubrimientos: la proporción de elasticidad al trabajo total de indentación, η_{IT} . Este parámetro permite la caracterización de propiedades elásticas y plásticas del recubrimiento que están estrechamente relacionadas a su resistencia a la fractura.

1.2.9 Mecanismos de daño y comportamiento de las grietas de recubrimientos depositados mediante proyección térmica

Ghabchi A. y colaboradores evaluaron el desgaste de mecanismos de recubrimientos delgados de cermets depositados mediante proyección térmica lo cual es una tarea difícil dados los numerosos procesos inducidos estructural y químicamente, así como la presencia de tensiones residuales. En un esfuerzo por comprender los daños mediante procesos bajo carga de contacto y su sensibilidad para los procesos que inducen atributos microestructurales, se utilizó la prueba rayado controlada. Evaluación detallada de la zona de daño resultante proporciona patrones de craqueo repetibles que se clasifican como (i) Colapso localizado de materiales, (ii) Grietas angulares, (iii) Grietas primarias semicirculares y desarrollado de grietas semicirculares y (iv) la delaminación del splat.

Una correlación se estableció mediante la vinculación de los mecanismos de daño que se observó y el proceso que indujo descripciones microestructurales incluyendo el papel de las condiciones de las partículas proyectadas y las tensiones residuales. Las correlaciones cuantitativas entre la delaminación de la carga para fisuras y las variables de los procesos inducidos incluyen las propiedades de las partículas como se describen por el concepto de índice de fusión no-dimensional como se establecieron las tensiones residuales. El índice de fusión reflejó el efecto combinado de las partículas térmicas y la historia cinética y por lo tanto la porosidad del recubrimiento y la decarburación inducida del proceso.

Los resultados ponen de relieve el papel fundamental de la densidad del recubrimiento y la evolución de las tensiones durante la formación del recubrimiento. La investigación apunta a que la prueba de rayado es un método de evaluación de gran alcance para caracterizar el comportamiento del contacto entre capas gruesas de cermet mediante proyección térmica incluyendo mecanismos operativos.

Un mapa del mecanismo de daño fue desarrollado para proyección térmica de los recubrimientos de WC-CoCr sometidos a prueba de rayado. Diferentes patrones de grietas se observaron debido a la superficie de carga de rayado; (i) Colapso localizado de material, (ii) Grietas angulares, (iii) Desarrollo de grietas semicirculares y grieta semicirculares primarias y (iv) Delaminación de splats. Las grietas de tipo (i) y (iv) fueron observadas específicamente en capas delgadas depositadas mediante proyecciones térmicas, mientras que los tipos (ii) y (iii) son genéricos y similares a los que se proyectaron mediante PVD y recubrimientos delgados CVD.

La prueba de rayado señaló distinciones en la respuesta al desgaste microestructura-contacto proporcionando tanto cualitativa como interpretaciones cuantitativas. Los resultados apuntan al role crítico de las tensiones y módulo de tensión sobre la resistencia al rayado. Los recubrimientos con una evolución en el aumento de la tensión y el módulo de tensión dieron resultados de mejoras en la fusión (cuantificados a través de parámetro de índice de fusión), además mostraron mayor carga crítica para la delaminación. La metodología proporciona una estrategia para el uso de la monitorización de proceso in-sitio como una herramienta para describe el comportamiento del recubrimiento bajo situaciones de carga de contacto.

1.2.10 Efecto de la distancia de proyección térmica

J.G. La Barbera-Sosa y colaboradores estudiaron el efecto que tiene la distancia de proyección sobre el comportamiento de la fatiga por corrosión de un acero de medio carbono revestido con una aleación de Colmonoy 88 depositado por pulverización térmica HVOF [130]. Algunos de los resultados que presentaron en el artículo se observan en la figura. 1.8, los cuales indican que, dentro de la norma, la desviación del número de ciclos a la fractura y las actuaciones de fatiga de los diferentes sistemas de sustrato-recubrimiento obtenidos por proyección térmica HVOF son muy similares. Este hecho sugiere que las distancias de pulverización no lo hacen tener un efecto significativo sobre el comportamiento de la fatiga por corrosión de estos sistemas, al menos en el intervalo de distancia de pulverización de 380-470 mm y tensión máxima alternada en el intervalo de 250-420 MPa. Se demostró que alternando tensiones de 250 MPa, en la prueba de fatiga por corrosión, la vida útil de las muestras proyectadas térmicamente mediante HVOF se incrementa por $\sim 350\%$ en comparación con el sustrato no recubierto.

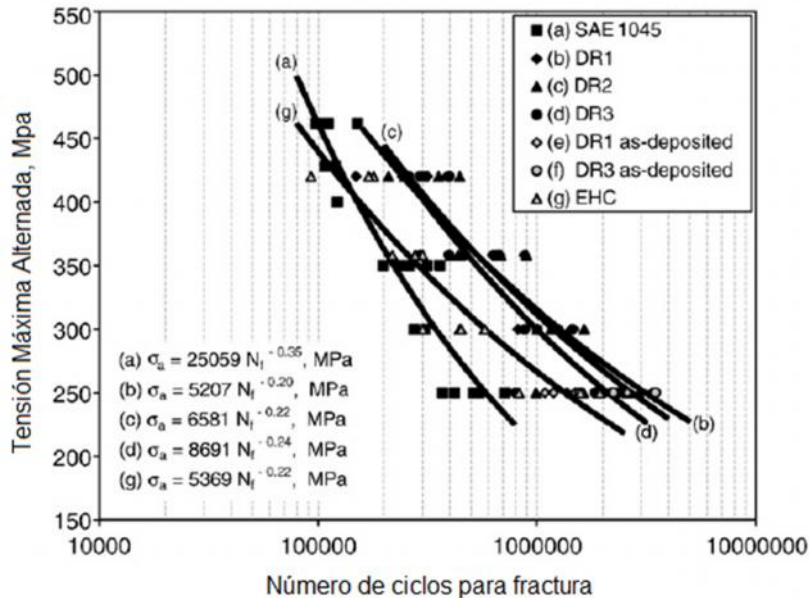


Figura 1.8 Cambio en el número de ciclos a la fractura como una función de la tensión máxima alternada para el sustrato de acero SAE 1045 con y sin revestimiento.

Se llegó a la conclusión de que la deposición de un recubrimiento de aleación de Colmonoy 88 en el sustrato de acero SAE 1045 tiene un aumento significativo en la vida útil y la resistencia a la fatiga por corrosión del sustrato a tensiones máximas alternas en la gama de 250-420 MPa. Sin embargo, teniendo en cuenta la desviación estándar de el número de ciclos hasta la fractura, el cambio en la distancia de proyección entre 380 y 470 mm no tiene aparentemente ninguna influencia en el comportamiento de la corrosión-fatiga de los sistemas recubiertos.

También se concluyó que el aumento en la vida útil y la resistencia a la fatiga por corrosión proporcionada por este recubrimiento mediante HVOF es mayor que la que ofrece el método EHC. Se observaron grietas de fatiga en la nucleación de la superficie libre del revestimiento, en asociación con defectos metalúrgicos presentes en ella y en la interfase sustrato-recubrimiento; esto debido a partículas de alúmina y muescas profundas producidas durante el granallado. El aumento de la vida útil a la fatiga por corrosión del sustrato se determina por la capacidad del recubrimiento para impedir la penetración de la corrosión entre la interfaz de sustrato-recubrimiento.

1.2.11 Evaluación de la resistencia de la unión de adhesión/cohesión

Venci A. y colaboradores evaluaron la resistencia de la unión de adhesión/cohesión de las capas de proyección térmica por plasma mediante pruebas de rayado en las secciones transversales de los recubrimientos [105]. Realizaron las pruebas de acuerdo a la norma ISO (ISO / WD 27307) [106], se analizaron y se compararon con el método de prueba estándar (ASTM C 633). Se utilizaron cuatro diferentes recubrimientos depositados por proyección plasma atmosférico. Los resultados mostraron que las pruebas de rayado podría ser utilizadas como un método eficaz para la evaluación de la cohesión de recubrimientos proyectados mediante plasma. Se trata de un método de prueba relativamente fácil y rápido, que también son una aplicación práctica; podría

también ser utilizado como un suplemento de algún método de prueba estándar como una caracterización de algún recubrimiento y de técnicas de control de calidad.

Se concluyó que después de la caracterización de cuatro diferentes espesores proyectados mediante plasma y examinados mediante la prueba de rayado y la prueba de tensión, algunas regularidades se establecieron. Primero que todo, se confirmó que para este tipo de material, la dureza no es la mejor propiedad para predecir las fuerzas de adhesión/cohesión que se esperaban. Una comparación directa de la fuerza de adhesión a la tracción y los resultados de la prueba rayado se puede cuestionar; aunque exista una tendencia general de que una tracción superior implica una mayor fuerza de unión en la prueba de rayado.

Además, el tipo de fallos para estos dos métodos de ensayo era diferente para el mismo recubrimiento. La prueba de rayado es un método de prueba relativamente fácil y rápido y podría ser fácilmente utilizado para indicar el tipo de unión adhesión/cohesión y la resistencia crítica para el recubrimiento observado. La prueba de rayado parece ser un método eficaz para la caracterización de la cohesión de los recubrimientos gruesos. Para aplicaciones prácticas la prueba de rayado, siendo básicamente una prueba de comparación, se puede utilizar como un suplemento al algún método de prueba estándar, y como una técnica de control de calidad.

1.2.12 Mejora de la resistencia al desgaste con proyección térmica

Nejat Y. Sari, Muharrem Yilmaz y colaboradores mejoraron la resistencia al desgaste de rollos de trefilado con polvos de Cr-Ni-B-Si+WC proyectados térmicamente [131]. Revestimientos de cinco tipos de NiCrBSi + WC con contenido diverso de partículas de WC se depositan en un acero AISI 1050. Encontraron en su investigación que el contenido de WC en polvo o en los polvos afectaba considerablemente la resistencia al desgaste hasta un cierto grado. Aunque el mecanismo de desgaste de todas las muestras mostró similitud, la profundidad y la cantidad de desgaste por rayadura sobre las superficies de las muestras mostraron diferencias.

Así como la densidad de carburo disminuye, el área superficial más resistente al desgaste también disminuye. Por otro lado, la superficie de la matriz con menor resistencia que los carburos, incrementa y causa la formación de grietas de rayadura que incrementan el desgaste. Por lo tanto, las superficies con carburos tienen alta resistencia al desgaste y la distancia entre carburos tienen una mayor importancia. Naturalmente, como esta distancia aumenta, la superficie de la matriz estará menos protegida por carburos y rayaduras profundas que se formarán en la matriz, y esto también aumentará el desgaste.

La distancia entre partículas de WC es correspondiente a 55% en peso de WC en el estudio que realizaron. El aumento adicional de esta proporción (55% en peso) contribuyó de manera significativa a proteger la matriz contra el desgaste. En las proporciones más bajas de WC (Por ejemplo, 40% en peso), la matriz no estaba protegida de manera efectiva debido al aumento de la distancia entre partículas de WC. Por lo tanto, la muestra que contenía 40% de WC mostró rayaduras más profundas y amplias que se formaron en la superficie del desgaste.

Encontraron que la proporción de peso óptimo para WC se obtuvo con 55% en peso el cual mejoraba notablemente la resistencia al desgaste.

1.2.13 Propiedades micromecánicas y el comportamiento al desgaste por rayadura

Bolelli G., Nohava J. y colaboradores estudiaron las propiedades micromecánicas y el comportamiento al desgaste por deslizamiento de proyecciones térmicas mediante HVOF de recubrimientos a base de aleaciones de Fe [42]. Estudiaron mediante pruebas de abrasión a tres cuerpos y pin on disk el comportamiento tribológico de dos recubrimientos de la aleación Fe–Cr–Ni–Si–B–C (Colferoloy) aplicados mediante proyección térmica HVOF. Los resultados fueron comparados con los obtenidos sobre capas de Ni–Cr–Fe–Si–B–C y Cr₃C₂–NiCr (también proyectadas mediante HVOF), galvanoplastia de cromo

duro y aceros para herramientas. A temperatura ambiente la pérdida de desgaste mediante pin on disk de el recubrimiento Colferoloy contra la contraparte de alúmina causada por una mezcla de abrasión leve, delaminación y tribo-oxidación, fue mayor que la de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ y de acero para herramientas, pero menor que la de Ni-Cr-Fe-Si-B-C y la capa metálica de cromo duro. A 400 °C y 700 °C, los recubrimientos de Colferoloy principalmente sufrieron desgaste ranurado: fueron superiores al recubrimiento de Ni-Cr-Fe-Si-B-C pero inferiores al de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. En el acero, los recubrimientos de Colferoloy, tuvieron una delaminación limitada y una pérdida de desgaste despreciable, comparable con el de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ y superior al de Ni-Cr-Fe-Si-B-C , acero para herramientas y galanoplastia de cromo duro a pesar de haber infringido un desgaste significativo al contracuerpo del acero.

Los recubrimientos de Colferoloy se validaron como alternativas a los recubrimientos con base Níquell y galanoplastia de cromo duro bajo condiciones de desgaste pin on disk, pero parecían inadecuados para evaluar la resistencia a la abrasión por partículas. Los diferentes comportamientos del desgaste mediante rayadura de los recubrimientos aplicados mediante proyección térmica HVOF pueden ser explicados por microacoplamiento y microdureza mediante la prueba de rayado, que reflejaron una resistencia a la fractura y deformación plástica.

2.Marco Teórico

2.1 Proyección térmica

2.1.1 Historia

El descubrimiento del proceso de pulverización térmica se atribuye al científico inventor Max Ulrich Schoop, nacido en Frauenfeld Suiza en Abril 10 de 1870. Experimentó con recubrimientos densos de metal en 1909 que posteriormente se llamarían proyecciones térmicas; además de publicar dos patentes en Alemania y Suiza sobre el proceso. La invención fue basada en un episodio de niñez que tuvo Max mediante la observación de un arma “*Flobert*” que al ser disparada contra una superficie, era apreciable como la bala se esparcía y se aplastaba formando un “*splat*” como se observa en la figura 2.1[20]

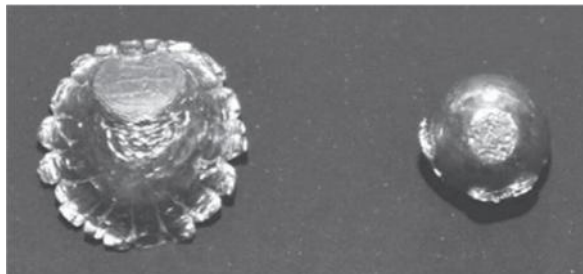


Figura 2.1 Splat de una bala de plomo [20]

En la figura 2.2 observamos la evolución del proceso de proyección térmica por llama, la parte (A) nos muestra el primer experimento patentado donde polvo del recubrimiento era

añadido a un chorro de aire a alta presión manualmente, lo cual evolucionó mediante la fusión térmica (B) y una combinación de ambas en (C). La evolución del proceso de deposición se debe en primera instancia a la mejora de propiedades mecánicas específicamente la resistencia al desgaste y la adherencia obtenida, lo cual mejora notablemente la resistencia a la corrosión [20]. Estos datos concuerdan con los trabajos realizados por Laura Marcela Dimaté y colaboradores [5] y Hernando Vélez Sánchez y colaboradores [7].

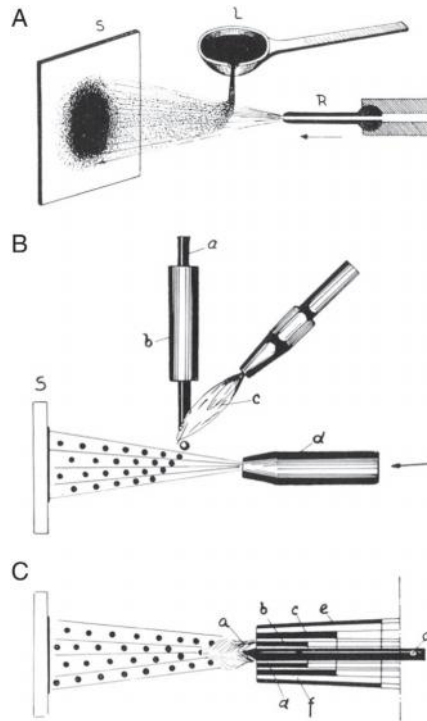


Figura 2.2 Evolución de la proyección térmica desde (A) según patente alemana 24460 (1882) hasta pasar por (B) y (C) [20]

Además de la patente y el proceso ya mencionado de pulverización existen otros grandes procesos de proyección térmica como son arco eléctrico y pistola de detonación (D-GUN), proceso inventado por R.M. Poorman, H.B. Sargent, y H. Lamprey patentado en 1955 [22], plasma spray inventado por R.M. Gage, O.H. Nestor, y D.M. Yenni patentado en 1962 [23], y oxicorte de alta velocidad (HVOF) inventado por G.H. Smith, J.E Pelton, y R.C. Eschenbach patentado en 1958 [24].

A través de los años se ha visto un avance tecnológico en cuanto importante del proceso de proyección térmica y apreciamos la cronología de la evolución térmica de pulverización, equipos, procesos y materiales en la figura 2.3 [15].

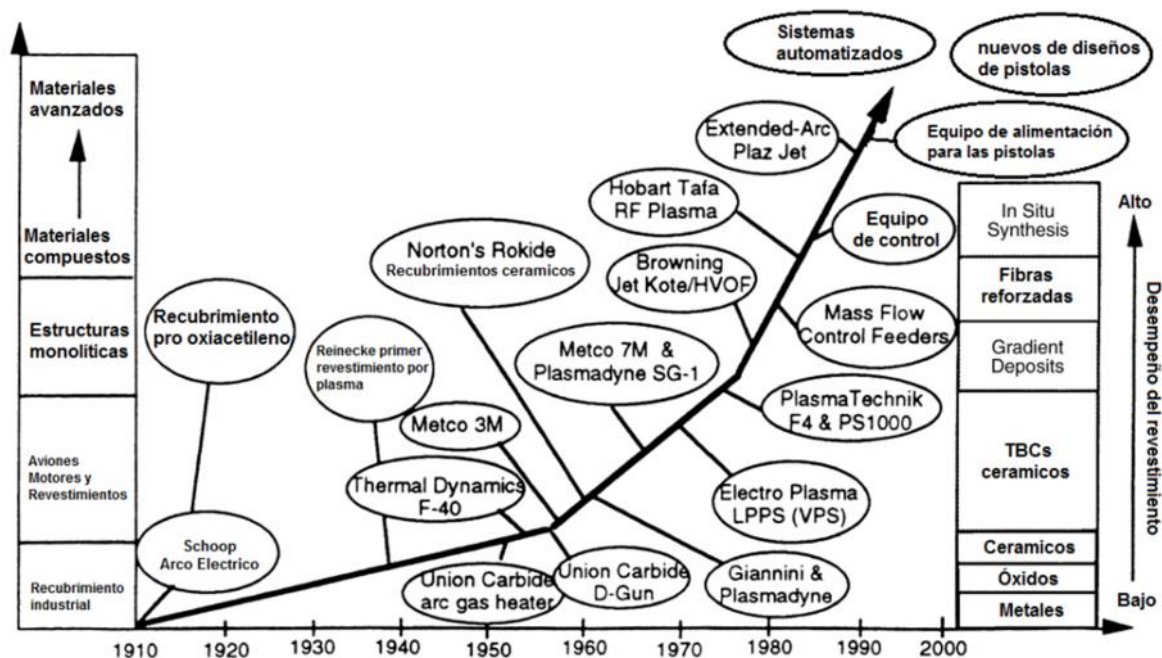


Figura 2.3 Cronología de la evolución térmica de pulverización, equipos, procesos y materiales. [15]

También se resalta el trabajo de la empresa Castolin Eutectic® [31] que a lo largo de su trayectoria han implementado tecnologías y equipos importantes tanto para la producción como la deposición y procesos posteriores de la proyección térmica. Luego de la invención del proceso por parte de Max Ulrich Schoop [20], se evidenció a nivel mundial (y más aún su vínculo social cercano), que el interés por el proceso era cada vez más alto y de hecho se encontraban investigando procesos similares además de ser contemporáneos con Jean-Pierre Wasserman de acuerdo a las fechas importantes que se ven en la tabla 2 [31].

Posterior a la fundación de la empresa Eutectic Castolin® se fundaron varias empresas en alianza directa con el señor Wasserman, entre estas empresas se encontraban Eutectic Welding Alloys Corporation y Messer Cutting & Welding. Además se crearon

varias patentes para los diferentes productos de Eutectic como la producción de polvos para desgaste en placas, EuTronic Gap®, RotoTec® y la creación del primer atomizador de gas anti-satélite del mundo.

Tabla 2 Fecha evolutivas Eutectic Castolin®. [31]

1906	Jean-Pierre Wasserman fundó Castolin Eutectic® en Lausanne, Suiza .Su aporte fue: descubrir una forma de baja temperatura para soldar hierro fundido.
1940	Se fundó Eutectic Welding Alloys Corporation en New York.
1960	Consolidación internacional bajo el nombre de Castolin Eutectic®.
1963	Lanzamiento de los polvos spray-fuse Eutalloy® para pulverización mediante fusión simultánea. Más de 42.000 unidades se vendieron.
1965	Producción de polvos mediante atomización con agua.
1969	Lanzamiento de EuTronic Gap®, un equipamiento para plasma en polvo transferido por soldadura de arco.
1971	Lanzamiento de RotoTec® Antorcha para el polvo de pulverización en frío. Más de 17.000 unidades fueron vendidas
1976	Producción de polvos mediante atomización de gases.
1985	Comercializado primer polvo amorfo del mundo para la proyección térmica.
1994	Patentada la producción de polvos para desgaste en placas.
1995	Liderando HVOF, Plasma y pulverización con alambre mediante TAFE
2000	Fusión de Messer Cutting & Welding y la creación del grupo MEC Messer Eutectic Castolin.
2005	Se crea una parte de la empresa Messer World de suministro de gas como complemento de la compañía.
2006	Primer atomizador de gas anti-satélite del mundo para la producción de los polvos

La principal ventaja de los procesos de rociado térmico es la amplia variedad de materiales que pueden utilizarse como materia prima para ser depositados como recubrimiento, siempre y cuando tengan la capacidad de fundirse sin descomponerse.

La segunda gran ventaja es la capacidad que tienen la mayoría de los procesos de rociado térmico, de poder aplicar recubrimientos sin llegar a calentar significativamente el

substrato [25]; es importante tener en cuenta éste ítem ya que precisamente el trabajo se basa en la temperatura del substrato.

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y entre ellas las tribológicas los recubrimientos rociados térmicamente se aplican con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste de una superficie o substrato. Otras aplicaciones comprenden el uso para la restauración dimensional de piezas desgastadas, barreras térmicas, conductores térmicos, protección electromagnética, etc. Estos recubrimientos son esencialmente usados por muchas industrias, incluyendo la aeroespacial, agraria, automotriz, industrias primarias de metales, minería, refinerías, químicas y biomédicas. Debido a esto, el campo de aplicación se cataloga en función de una serie de requerimientos mínimos involucrados en el proceso, como por ejemplo la creación de barreras térmicas para aislantes térmicos, anti-adherencia para facilitar la limpieza, recubrimientos en elementos biomédicos, reconstrucción para restaurar dimensiones y tolerancias, alta resistencia térmica, resistencia al desgaste, a la corrosión, erosión, desgaste, cavitación, oxidación, entre otras.

Una variante de la pulverización de plasma utiliza un arco transferido para calentar la superficie que está recubierta. Se considera por algunos como un proceso de soldadura similar a revestimientos duros en lugar de un verdadero proceso de proyección térmica, porque la superficie del sustrato se vuelve momentáneamente fundida, inmediatamente debajo de la antorcha [20][21].

2.1.2 Descripción de los procesos:

Los procesos de rociado térmico difieren básicamente en tres aspectos fundamentales:

El termorrociado (Thermal Spray Protección, THSP), el cual es un grupo de procesos mediante los cuales partículas finamente divididas de materiales metálicos y no metálicos en estado semifundido impactan una superficie preparada para formar un revestimiento

de protección o redimensionamiento como se presenta en la figura 2.4 que a su vez puede ser metálico o no metálico.[32]



Figura 2.4 Proyección térmica en proceso.

Los procesos de proyección térmica difieren de tres aspectos importantes:

- 1) Material de alimentación.
- 2) Método de calentamiento aplicado.
- 3) Método de proyección del material sobre el sustrato.

El material de alimentación puede ser incorporado al proceso en forma de polvo (por medio de una tolva como es el caso de la proyección térmica con polvos) [27], alambre y barra cerámica (a través del uso de rodillos) [29]. En la figura 2.5 se muestran los pasos para llevar a cabo el proceso de rociado térmico [30][31], donde se aprecia que la diferencia entre los procesos es solo al inicio de la operación, ya que el resto del proceso es similar para los diferentes tipos de proyección.



Figura 2.5 Proceso de proyección térmica [31]

La proyección térmica conocida también como termorrociado, el cual es un grupo de procesos mediante los cuales partículas finamente divididas de materiales metálicos y no metálicos en estado semifundido impactan una superficie preparada para formar un revestimiento de protección o redimensionamiento para posterior acabado que a su vez puede ser metálico o no metálico como se presenta en la figura 2.6 [33].

Así mismo en la figura 2.6 se presenta un modelo de un sistema de termorrociado, en el cual destacan los sub-sistemas siguientes: [32][33]

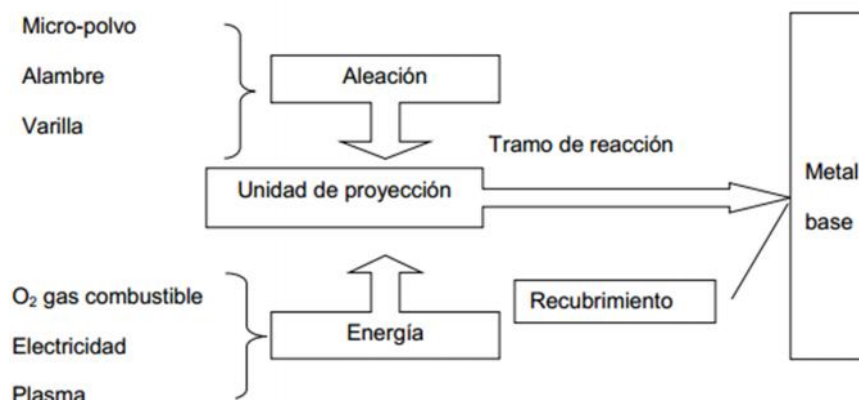


Figura 2.6 Modelo de sistema genérico de termorrociado [32]

a) Fuente de Energía:

En los sistemas de termorrociado se emplean diversas fuentes de energía, tales como gases O₂ y C₂H₂ a objeto de producir una combustión; energía eléctrica para producir un cortocircuito mediante alambres que son atomizados; y gases mono o di-

atómicos, de bajo nivel energético de disociación para producir un arco plasma [33].

b) Material a depositar:

Se emplean los más diversos materiales y en distintas formas. Por ejemplo, para el proceso de arco eléctrico, a objeto de producir el cortocircuito referido, el material viene conformado en bobinas de alambres y por supuesto, debe ser material conductor de la electricidad [33]. En el proceso por plasma y en la mayoría de los sistemas de combustión, se emplean micro-polvos, con una gamma limitada de materiales susceptibles de ser proyectados. Se destaca la proyección de micro-polvos metálicos, carburos, cerámicas y plásticos.[33]

c) Unidad de proyección:

Este subsistema conjuga la entrada de los dos subsistemas anteriores. Por un lado, procesa la fuente de energía para producir la fuente de calor, una llama O₂ y C₂H₂ por ejemplo, e incorpora a la vez el material a depositar a esta fuente de calor, el cual experimentará una serie de reacciones físico-químicas que posibilitan su proyección y adherencia [33].

Como ya lo observamos, los procesos de proyección térmica depositan materiales finamente divididos, ya sean metálicos o no metálicos sobre las superficies de los sustratos, generalmente de naturaleza metálica. Los materiales que se depositan son alimentados en forma de polvos, alambres, alambres tubulares y barras cerámicas y son calentados a un estado plástico o fundido, ya sea por procesos de combustión o por arco eléctrico.

Ahora bien las características físicas del depósito como la velocidad de dispersión de las gotas están en el rango de 50 a >1000 m/s [34]. Las altas temperaturas y velocidades de las partículas rociadas hacen que se deformen en el impacto sobre la superficie, produciendo capas delgadas o láminas, que se conocen con el nombre de "splats", las cuales conforman y se adhieren al sustrato. Por lo general el tamaño de los "splats" es de entre 1 a 20 μm , y cada gota enfría a un ritmo alto $>10^6$ K/s, para los metales y una formación uniforme. De aquí se desprende, que finos granos forman una capa policristalina depositada [36]. En la figura 2.7 se muestra un esquema general de un proceso de consolidación de polvos a través de la proyección térmica.

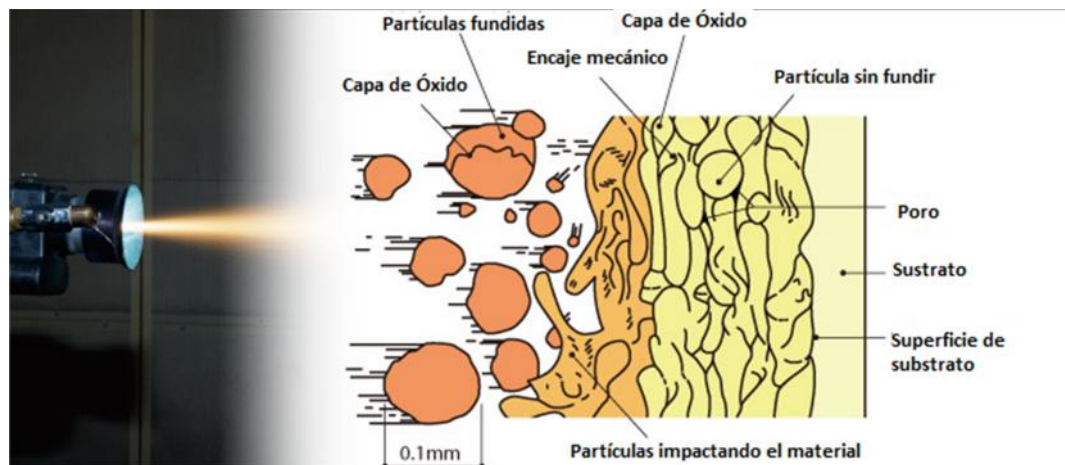


Figura 2.7 Esquema general proceso de consolidación de polvos a través de la proyección térmica [35].

Las capas de proyección usualmente contienen algún grado de porosidad, típicamente entre 0 y ~10% [21], algunas partículas semifundidas o sin fundir, “splats” totalmente deformados y fundidos, fases meta-estables, y oxidación debida a la incrustación de aire entre los poros. La llama de los procesos de proyección térmica es caracterizada por grandes diferencias térmicas y de velocidad (gradientes). La materia prima está por lo general en forma de polvo con una distribución de tamaños de partícula que oscila las décimas de milímetro (~0,1mm) [35].

Cuando estos materiales en polvo son proyectados gracias a la presión de gases de la llama, porciones de la distribución de polvo toman caminos preferenciales de acuerdo a su inercia. Como resultado algunas partículas pueden estar completamente sin fundir y pueden crear porosidades o incrustadas en el recubrimiento. Debido a la gran variedad de aplicaciones que presenta los procesos de proyección térmica en los que se cuentan: protección contra la corrosión, desgaste, restauración dimensional, barreras térmicas, conductores térmicos, conductores eléctricos para campos electromagnéticos, mejorar o retardarla redición. Gracias a esta información se concluye que se usan en toda la industria, incluida la industria aéreo-espacial, implementos de agricultura, automotriz, metales primarios, minería, papelería, producción de gas y aceite, química, y plástico biomédicos, etc [21][37].

2.1.2.1 Parámetros de la proyección térmica

Al igual que en otros procesos similares donde la temperatura es la fuente de energía principal, se deben tener en cuenta algunos factores para tener un adecuado y homogéneo recubrimiento.

- Distancia de proyección: Longitud medida perpendicularmente desde la unidad de proyección hasta el sustrato. Generalmente esta longitud varía en el rango de los 40mm hasta los 300mm aproximadamente, y depende de la técnica que se emplee para la deposición del recubrimiento [3] [15].
- Presiones de los gases: Es importante que se tengan en cuenta las presiones a las cuales se produce el flujo de gases dentro de la unidad de proyección para generar la combustión y/o el transporte de material de aporte hacia el sustrato; ya que una baja presión podría generar mala adherencia del recubrimiento sobre el sustrato y presiones muy altas no permitirían la fusión del material de aporte. [6][15].
- Tasa de alimentación del material de aporte: Cantidad de material que se suministra a la unidad de proyección por unidad de tiempo. Es independiente del tipo de material de aporte (polvo y alambre) y se determina de acuerdo a su densidad.

Para obtener una alta calidad del recubrimiento, además de buenas propiedades tribológicas (resistencia a la fricción, buena adherencia, etc.); es necesario tener un control avanzado de los parámetros del proceso.

Si no se tienen en cuenta los parámetros es muy probable que el recubrimiento se vea afectado, como por ejemplo si la tasa de alimentación del material de aporte no se regula, se generarán partículas no fundidas con tasas muy altas, o fundiendo las partículas hasta oxidarlas, con tasas muy bajas [3].

Cuando se habla de las propiedades de los recubrimientos depositados mediante la técnica de proyección térmica, usualmente se expresan en términos de resistencia a la corrosión, adherencia con el sustrato, dureza, conductividad eléctrica y térmica,

resistividad y resistencia dieléctrica, propiedades magnéticas y ópticas, como la absorbencia y la reflectividad, maquinabilidad, entre otras.

El valor de importancia de estas propiedades se basa en la función para la cual el recubrimiento ha sido diseñado. Las características típicas del recubrimiento tales como la porosidad, la cohesión de los “splats” y el contenido de óxido, tienen un valor importante en las propiedades descritas.

La adherencia del recubrimiento con el sustrato, y la cohesión entre los splats se ve afectada por las fuerzas de atracción a nivel atómico, los esfuerzos residuales al interior del recubrimiento, derretimiento y aleación localizada en el contacto entre las superficies de las partículas y entre el sustrato y las partículas colindantes, entrelazamiento mecánico, difusión de especies elementales a través de los límites de cada “splat”. [39]

Como ya fue descrito en la frase anterior la resistencia a la adherencia del recubrimiento con el sustrato es gobernada por los esfuerzos residuales en los recubrimientos, normalmente y aun cuando la falla del recubrimiento aparenta ocurrir en la interfase entre el sustrato y el recubrimiento, el material residual del recubrimiento se halla adherido al sustrato. Las fallas en la adhesión y la cohesión del recubrimiento se atribuyen usualmente a los esfuerzos al interior de la estructura. La mayoría de las fallas en el recubrimiento ocurren en la interfase recubrimiento-sustrato, debido a que es el lugar donde existen mayores discontinuidades en el sistema del material [39].

2.1.2.2 Mecanismo de adherencia:

La proyección térmica es un proceso muy similar a otro proceso como lo es la soldadura; Sin embargo, una diferencia esencial es que con la soldadura el material agregado y parte del material base se funden (formando un enlace metalúrgico), mientras que con la proyección térmica las gotas fundidas se adhieren a través de un anclaje mecánico.

A pesar del hecho que la unión es mecánica, se puede lograr fuerzas de adhesión muy altas. Algunos procesos son capaces de lograr fuerzas de adhesión que exceden a los 69 MPa [32][40].

Siempre y cuando un material no sublime o descomponga a temperaturas cercanas a su punto de fusión, puede ser aplicado a través de proyección térmica. [32]

Se define como tiempo de reacción, el tiempo en el cual el material proyectado se encuentra inserto en la fuente térmica y/o durante su proyección, tiempo en el cual los micropolvos sufren una serie de reacciones de índole física y química [32][41].

En la figura 2.7 se presentó la interacción de los subsistemas, en este caso a una llama oxiacetilénica se le inyectan los micropolvos, el que se encuentra inicialmente a temperatura ambiente [41]. Así, el calor que será absorbido por los micropolvos sólo es tomado del poder calorífico del acetileno [32], el cual se calcula a partir de la ecuación (1):

$$q = K \cdot Q \quad (1)$$

donde:

q : Tasa de liberación de calor $\frac{BTU}{h}$

K : Constante de gas $C_2 H_2 = 1440 \frac{BTU}{ft^3}$ [43]

consumido.

Q : Flujo de $C_2 H_2 \frac{ft^3}{h}$

La temperatura de la llama es de aproximadamente 3100°C (57000°F) y el micro polvo se inyecta a temperatura ambiente de 20°C; lo que da origen una transferencia de calor de llama a partícula, por lo tanto, es calentada y eleva su temperatura hasta plastificarla. En algunos casos, la partícula permanecerá el tiempo suficiente en la llama, como para ser fundida. [44]

2.1.3 Descripción de los procesos:

El proceso de proyección térmica tiene varios factores importantes que se deben considerar para seleccionar el método adecuado, a continuación nombraremos algunos y veremos las técnicas usadas comúnmente según las necesidades del usuario [38]:

- Antes que nada la limpieza es fundamental para una buena adherencia.
- La parte económica.
- El material del recubrimiento y la reacción con el sustrato
- El tamaño de la pieza a proyectar y si la proyección se hace sobre el sitio o si es posible cambiar de lugar la pieza para realizar el proceso.

Según las necesidad y los factores anteriormente mencionados, existen diversos métodos de proyección térmica, pero lo que tienen en común es que usan energía eléctrica o química para calentar materiales de alimentación e inyectados en chorros de gas caliente para crear una corriente de material en polvo para recubrir que posteriormente se convierte en gotas fundidas que se aceleran y se proyectan sobre los sustratos. En la figura 2.8 se aprecian los diferentes procesos térmicos de pulverización y se observa que se pueden dividir de acuerdo a la fuente de energía (combustión vs eléctrica), la forma de alimentación de material (en polvo o sólido), y condiciones ambientales (aire, de baja presión [vacío], gas inerte, etc.)y como vimos anteriormente a las necesidades del usuario.

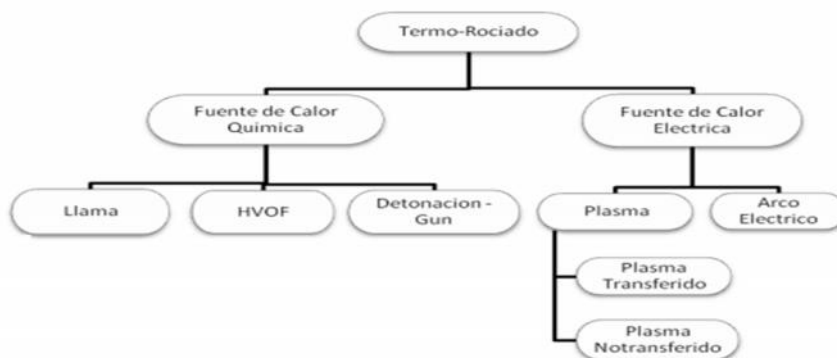


Figura 2.8 Procesos térmicos de pulverización [21][32].

En la tabla 3 se observan los métodos de proyección térmica, los cuales son divididos en dos grandes o categorías (a) y (b) y una tercera(c) [21] :

- a) Proyección por combustión (flama-polvos/alambres/varillas, HVOF)
- b) Arco de alambre o arco de pulverización (aire o gas inerte)
- c) Plasma (directo corriente de aire vacío, inerte o spray de plasma atmosférico, inducción RF)

Tabla 3 Métodos de generación de procesos de proyección [21].

Energía de entrada por gas	Variación	Técnica de proyección
Descarga eléctrica	Arco DC	AS, APS, VPS
	Arco pulsado HF descarga lumínica	RF, Plasma spray
Combustión	Explosión Continua	HVOF, FS D-gun
Descompresión de gas		CGSM

2.1.3.1 Calentamiento por combustión

Cabe aclarar que el calentamiento por combustión se subdivide en: combustión por llama y detonación; y así mismo la combustión por llama puede ser subdividida en convencional y oxi-combustible de alta velocidad (HVOF).

Ya que la investigación se realizó mediante el proceso de combustión por llama, solo nos centraremos en la explicación de ésta.

2.1.3.1.1 Combustión por llama

Este método usa la energía química de combustión de un gas combustible con oxígeno como fuente de calentamiento para fundir el material del recubrimiento. Estos materiales

pueden ser metálicos y no metálicos, y con puntos de fusión menores a 2000 °C [21]. En la figura 2.9 se puede observar un esquema que ilustra el uso de polvos como material de alimentación. La entrada del gas es axial, el polvo puede ser introducido axialmente o radialmente en la antorcha, los alambres o varillas pueden ser usados en vez de polvos. Las partículas de material son fundidas en la llama y aceleradas en dirección al sustrato. La relación de la mezcla oxígeno-combustible puede variar resultando en una atmósfera carburante u oxidante [21]. La temperatura de la llama variaría de 2700 a 3100°C y la velocidad entre 80 a 100 m/s. Este proceso produce recubrimientos porosos y con limitaciones de adherencia, a cambio de ello, es el equipo más barato [21][45].

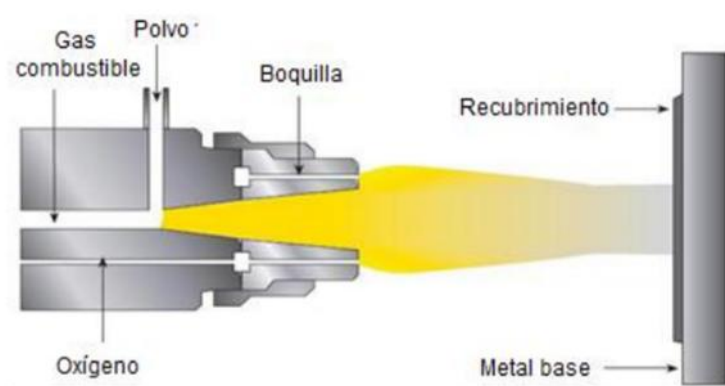


Figura 2.9 Pistola alimentada con polvos para proyección térmica [32]

En el proceso de proyección térmica por llama se funde el material (polvo o alambre) a través de la descarga de energía química como resultado de un proceso de combustión. El proceso de combustión consiste en quemar un gas combustible (a veces líquido) en presencia de oxígeno (o aire comprimido). El gas combustible usado comúnmente para la proyección térmica por llama, es el acetileno debido a su alta temperatura de combustión (3100 °C) y a su bajo costo [46]. Otros gases combustibles como el propano, hidrógeno o gas natural también se usan. El aire comprimido se usa de ayuda en la proyección de las partículas. Si la oxidación de las partículas proyectadas es un problema, se usa gas inerte comprimido como argón o nitrógeno son usados para proteger las partículas fundidas.

Cuando el proceso utiliza alambre y varilla, la pistola tiene un conducto para alimentar aire a alta presión para atomizar el alambre o varilla semifundidos. El alambre o varilla se alimentan mecánicamente a través del centro de la pistola en la zona de calentamiento.

En la figura 2.10 se presenta una pistola alimentada con alambre. Una ventaja significativa de las pistolas con alambre sobre los polvos es que el grado de fusión es significativamente mayor, produciendo recubrimientos más densos. Además, el aire de atomización produce gotas muy finas, que a su vez producen revestimientos más delgados y lisos. [32]

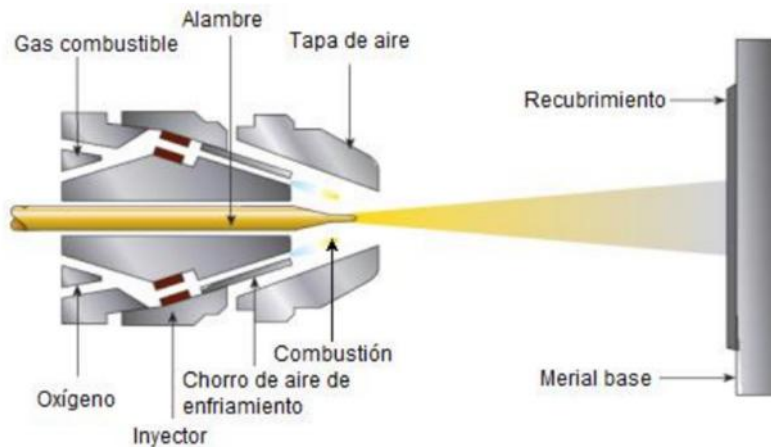


Figura 2.10 Pistola alimentada con alambre para proyección térmica [32]

En los procesos por flama, la relación combustible/oxígeno se ajusta adecuadamente para producir la combustión deseada. Además, un chorro de aire opcional se puede utilizar para ajustar al perfil térmico de la flama. Las velocidades del chorro de gas normalmente están por debajo de 100 m/s (330 pies/s), generando velocidades de partículas de hasta 80 m/s (260 pies/s) antes del impacto. [48]

Las temperaturas de las partículas pulverizadas son generalmente por encima de 2600 °C (4700 °F) y son controladas por las temperaturas de combustión de las mezclas de combustible/oxígeno y los patrones de mezcla de los gases de combustión con el aire circundante. La flama se regula para ser carburante para la mayoría de los casos con el fin de minimizar la oxidación. Generalmente, las pistolas están diseñadas para recoger parte del oxígeno necesario para la combustión del aire de atomización o chorros de aire de enfriamiento. Además, este diseño ayuda a producir recubrimientos metálicos con una menor cantidad de óxidos [48].

2.1.3.1.1.1 Combustión convencional:

Este proceso proyecta material semifundido debido a la combustión del oxígeno con el combustible, produciendo revestimientos porosos y con limitaciones de adherencia; pero la ventaja es el bajo costo que tiene el equipo en el mercado, pues es el más económico. Las antorchas de aspersión por flama, en su mayoría, pueden ser adaptadas para usar diversas combinaciones de gases, con el fin de obtener una optimización de los costos y la calidad del revestimiento [32][50].

Como y se había comentado anteriormente, los gases usados comúnmente son el acetileno, propano e hidrógeno combinados con el oxígeno. Claro está que por la alta temperatura de combustión que alcanza, como se observa en la tabla 4, el acetileno es el más usado; ya que se obtienen temperaturas de llama más altas. El material de aporte puede presentarse en forma de polvos, alambres, varillas o tubos; entonces prácticamente es necesario solo cambiar la boquilla y la tapa del aire, según la figura 2.9 y la figura 2.10; para adaptar la antorcha a las diferentes aleaciones, gases o tamaños de alambre.

Tabla 4 Temperaturas de fuentes de calor. [32][51]

Fuente	Temperatura, °C
Propano-oxígeno	2526-2640
Gas natural-oxígeno	2538-2735
Hidrógeno-oxígeno	2660-2690
Propileno-oxígeno	2843
MAPP-oxígeno	2927
Acetileno-oxígeno	3000-3100

El principio de funcionamiento se puede observar en la figura 2.11, en la cual se usa polvos como material de alimentación. La entrada de gas es axial y el polvo puede ser introducido axialmente o perpendicularmente en la antorcha. Las partículas de material son fundidas en la llama y aceleradas en dirección al metal base. La relación de la mezcla oxígeno - combustible puede variar de 1:1 a 1.1:1, resultando en una atmósfera

carburante u oxidante, respectivamente. La temperatura de la llama varía de 2700 a 3100 °C y la velocidad entre 80 a 100 m/s [52].

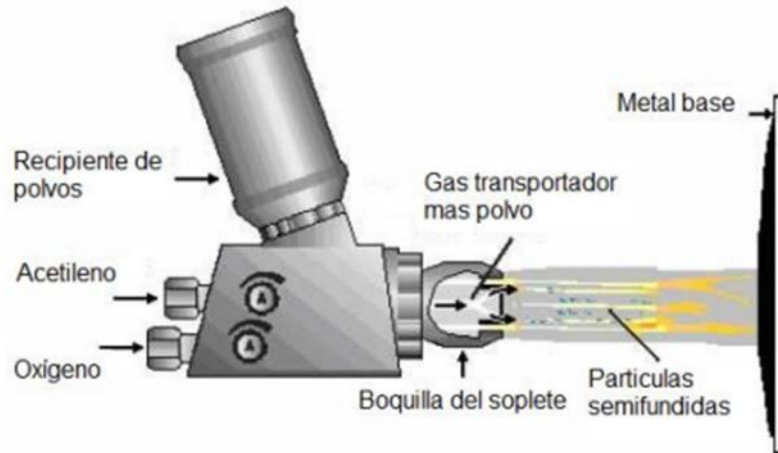


Figura 2.11 Esquema del proceso de proyección térmica por flama con polvos [32] [50]

Los polvos se inyecta a temperatura ambiente, en donde la aleación pulverizada y la llama acetilénica tiene la misma trayectoria, lo que da origen a una transferencia de calor de la llama a la partícula, por lo tanto, la partícula es calentada, elevando sucesivamente su temperatura hasta quedar semifundidas, y en algunos casos la partícula permanecerá el tiempo suficiente en la llama hasta ser fundida.

Además, de elevar el nivel de energía térmica de la partícula, éstas son fuertemente aceleradas por la expansión de los gases de combustión, por lo que también experimenta un fuerte incremento en términos de energía cinética. [32]

Este haz de partículas semifundidas y fundidas que tienen altas velocidades, impactan sobre la superficie de la pieza, ante lo cual las partículas se deforman, adaptándose a la rugosidad de la pieza que ha sido preparada y por lo tanto se anclan mecánicamente. En muchos casos poseen suficiente energía tanto térmica como cinética, para producir una difusión metalúrgica con el metal base, produciéndose a lo largo de la interface metal

base-recubrimiento, una red continua de microsoldaduras, en donde la adhesión del recubrimiento por proyección térmica, es atribuible tanto al anclaje mecánico y a una difusión localizada. Por lo tanto, es posible definir el grado de adherencia en función de los valores “q” (calor) y “Vp” (Velocidad de partícula), de cada sistema de proyección térmica [54].

La eficiencia en la transferencia de calor de la llama a las partículas dependerá del tamaño y la forma de ésta. Un tiempo demasiado largo implicará excesiva transferencia de calor, oxidando las partículas, las cuales serán depositadas en conjunto con el óxido, tanto el tamaño como la forma de la partícula son variables que pueden ser controladas mediante el proceso de fabricación adecuado y constituyen los parámetros más importantes que determinan la calidad de una aleación micro pulverizada.

Es por ello que a partir de la década de los 50 la proyección térmica logro afianzarse y ser aceptada industrialmente, ya que fue posible fabricar aleaciones micro pulverizadas con granulometría y formas consistentes, minimizando así los defectos propios de distribuciones de tamaño de partícula y geometría no adecuadas [52]

La partícula debe tener un diámetro nominal preestablecido para el tipo de sistema que se va a usar. Para un sistema de alto poder calorífico, una partícula de diámetro nominal inferior al requerido, implicará una excesiva transferencia de calor por unidad de área superficial, produciéndose oxidación por alta temperatura.

A la inversa, partículas de diámetro nominal mayor al requerido no absorberán suficiente calor y no logran semifundirse, menos aún fundirse, impidiendo el anclaje mecánico. Las características y temperaturas de la llama dependen de la proporción oxígeno – gas combustible y de las respectivas presiones. En la figura 2.12 se presenta una pistola de proyección térmica por flama con aspersion de polvo.

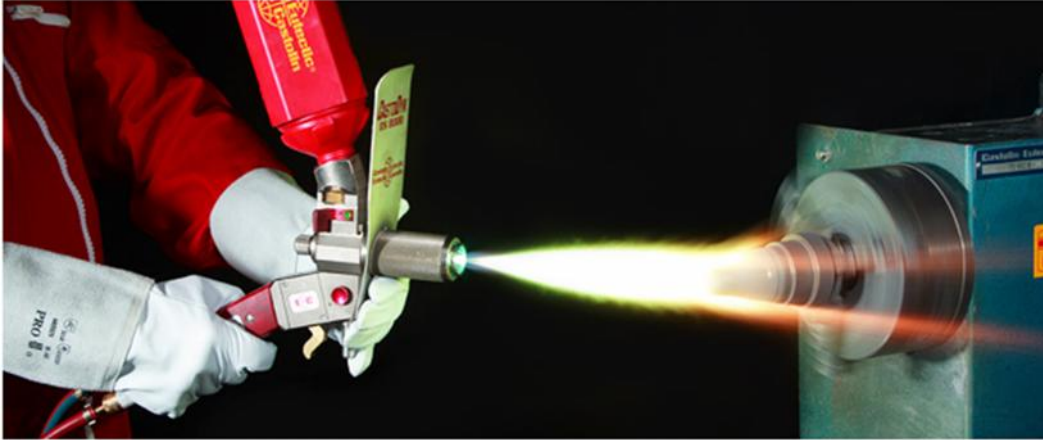


Figura 2.12 Pistola de proyección térmica por flama con aspersión de polvos [54]

El proceso de proyección térmica de combustión con polvos metálicos como materia prima, utiliza la mezcla de los polvos metálicos con una corriente de gas, que puede ser aire o un gas combustible. Esta corriente se alimenta en un inyector central, rodeado por un orificio anular. El orificio anular se alimenta con una mezcla combustible gas y oxígeno, que genera una llama en el soplete y al atravesar las partículas por la llama que han sido arrastradas por el gas combustible da lugar a que se semifundida la mayor parte de las partículas. El aire comprimido u otro gas son alimentados a través de orificios anulares que rodean los puertos del gas, con el objetivo de proyectar hacia el metal base las partículas fundidas [50]. Este tipo de proyección térmica es capaz de depositar una amplia gama de materiales, que van a partir de polímeros a las cerámicas refractarias y metales.

2.1.3.1.1.1.1 Equipo:

En las pistolas alimentadas con polvo, el polvo puede ser suministrado de dos maneras: Por gases de arrastre o por gravedad. Los dispositivos por fuerza de la gravedad tienen cartuchos de polvo montados en la parte superior de la pistola. La tasa de alimentación del polvo está controlada por una válvula de restricción en la antorcha, donde es aspirado por los gases que fluyen a través de la pistola. Con las pistolas de gases de arrastre, el

polvo es alimentado con unidades montadas en el exterior. Los alimentadores de polvo utilizan una corriente de gas portador para transportar el polvo desde el alimentador, a través de una manguera hasta la pistola. Entre los gases portadores utilizados para la aspersion por flama son comúnmente aire o nitrógeno [55].

En las pistolas alimentadas con alambre o varilla el material base es suministrado de manera mecánica por medio de unos rodillos de alimentación, que tiran el alambre o varilla desde la fuente de materia prima y lo empujan a través de la boquilla.

2.1.3.1.1.1.2 Variables:

Las variables que pueden afectar el proceso de proyección térmica mejorando el recubrimiento según las necesidades de la industria ya sea para las diferentes utilidades según la pieza a tratar.

Espesor máximo de capa

Los espesores máximos dependen del tipo de material que se aplique. Para un material cerámico, el espesor máximo puede estimarse entre 0.3 a 0.5 mm de capa rectificada, mientras que sin ningún tipo de terminación posterior a la aplicación, se pueden estimar 0.7 a 0.9 mm. El mismo caso puede adoptarse para materiales a base de carburos. En el caso de materiales metálicos, el límite de espesor puede tomarse considerablemente mayor, llegando en algunos casos hasta los 2 o más milímetros [56].

Es importante aclarar también, que en la mayoría de los casos es necesario considerar un espesor de capa mínimo de 0.1 mm, salvo casos particulares donde pueden realizarse capas de 0.05 mm [56]. Teniendo en cuenta que a mayor punto de fusión de los materiales del recubrimiento; las partículas son más finas [59].

2.1.3.1.1.2 Proceso de proyección térmica en dos etapas (Aspersión y fusión)

El primer paso es la deposición por aspersión del polvo en el lugar, durante la aspersión, el polvo alcanza su temperatura de fusión, ablandándose y deformándose antes del impacto, pero el revestimiento aún permanece con un alto grado de poros entre las partículas. El segundo paso es la fusión del revestimiento con flama, por inducción, hornos al vacío, entre otros, para densificar el recubrimiento eliminando la mayoría de los poros. El mojado [57] y coalescencia [58] son realizados a través de la fusión de los óxidos en los polvos y en la superficie del metal base. La fusión es requerida como un postratamiento en la proyección térmica con la mayoría de las aleaciones duras autofundibles [32]. Por otro lado, este proceso está limitado a la geometría de la pieza, debido esencialmente a la necesidad de producir una fusión superficial a una temperatura entre 950 y 1050 °C [54].

2.1.3.1.1.3 Proceso de proyección térmica en una etapa (Aspersión y fusión)

Este proceso consiste en la proyección y fusión simultánea de la aleación, esto se logra debido al reducido tamaño de la partícula. La pieza y/o área a recubrir deben ser pequeñas, estar precalentadas y la distancia boquilla-pieza deberá ser menor que en el proceso de dos etapas. Las capas fundidas son bastante densas, prácticamente exentas de poros y exhiben uniones metalúrgicas. La dureza del revestimiento puede llegar a 65 HRC.[8][54] En virtud de las temperaturas utilizadas para el tratamiento térmico, entre 1010 y 1175 °C, el uso de estos revestimientos es limitado a metales base que pueden soportar estas temperaturas. Las temperaturas de fusión pueden alterar las propiedades obtenidas por tratamiento térmico de algunas aleaciones, aunque esto es únicamente superficial, a no ser que la temperatura de fusión de la aleación sea demasiado bajo. Los revestimientos autofundibles son ampliamente utilizados en aplicaciones de desgaste excesivo combinado con altos esfuerzos en la interface revestimiento/metal base (cizallado o impacto) [9][16].

La distancia de aspersión, es la distancia entre la extremidad de la antorcha y el metal base, esta varía normalmente entre 120 a 250 mm [8], con un ángulo de trabajo usualmente de 90° (llama perpendicular al metal base), lo cual puede ser alterado

en función de la forma del metal base. La atmósfera de aplicación de los revestimientos es por lo general aire. La resistencia de adhesión puede alcanzar 60 MPa para revestimientos de Ni-Al o hasta 70 MPa para aleaciones autofusibles, por termorrociado por flama convencional. Los valores típicos están entre 15 MPa para revestimientos cerámicos y de 30 MPa para otros materiales. La porosidad está entre el 10 y 20%, pudiendo ser prácticamente mucho menor para los revestimientos autofundible. Los espesores de aplicación típicos están entre 0.1 a 2.5 mm [52][32].

Para tener una idea más general de los datos anteriormente nombrados en la table 5 se presentan valores de porosidad y adherencia que se pueden obtener por la técnica de proyección térmica con llama según la familia de recubrimientos, donde se puede observar que a mayor adherencia, menor porosidad y que los mayores espesores se presentan en las aleaciones no ferrosas y por el contrario los valores más elevados de dureza en los cerámicos. Además se dan las propiedades de los recubrimientos de polvo por combustión. [21][60][61]

Tabla 5 Propiedades de diferentes polvos aplicados por la técnica proyección térmica por llama [60][61]

PROPIEDAD	RECUBRIMIENTO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
ADHERENCIA (MPa)	Aleaciones ferrosas	14	21	17,5
	Aleaciones no ferrosas	7	34	20,5
	Cerámicos	14	34	24
	Carburos	34	48	41
POROSIDAD (%)	Aleaciones ferrosas	3	10	6,5
	Aleaciones no ferrosas	3	10	6,5
	Cerámicos	5	15	10
	Carburos	5	15	10
DUREZA (Rc)	Aleaciones ferrosas	35	35	35
	Aleaciones no ferrosas	20	20	20
	Cerámicos	40	65	52,5
	Carburos	45	55	50
ESPESOR (mm)	Aleaciones ferrosas	0,05	2	1,025
	Aleaciones no ferrosas	0,05	5	2,525
	Cerámicos	0,25	2	1,125
	Carburos	0,15	0,8	0,475

2.2 Recubrimientos

Para el trabajo de investigación se trabajó con dos tipos de recubrimientos en polvo Nitec 10224 y Metaceram 23075; hablaremos de las propiedades de cada uno de ellos por separado.

2.2.1 Nitec 10224

El recubrimiento Nitec 10224 es una aleación base de níquel con adiciones de hierro, boro y silicio [8] [54] y comúnmente se usa para proteger las capas de elementos mecánicos de múltiples aplicaciones en metales como son los aceros, las fundiciones de hierro, bronce y aleaciones de níquel. El depósito es fusible y autofundente debido a la presencia de boro y silicio en su composición química [62].

Es fácilmente mecanizable con herramientas estándar, y debido a su bajo coeficiente de fricción, es ideal para la protección de piezas metálicas en contacto con otros metales. Posee excelente resistencia al desgaste, a la corrosión y a altas temperaturas. Su uso se encuentra destinado a labores de mantenimiento de ingeniería, con las cuales se busca aumentar la confiabilidad de las piezas tratadas. También se emplea en tareas de rectificado de superficies y en corrección de defectos de colada de piezas fundidas. La técnica de proyección térmica para la deposición de este recubrimiento, proporciona resultados muy superiores a los procesos de reparación convencionales, y un ahorro significativo en los costos de reparación, incluyendo los procesos de mecanizado. La presencia de níquel como elemento predominante, proporciona buena resistencia a la corrosión en medios salinos como el agua de mar [3]. En la tabla 6 se aprecian las principales características del Nitec 10224, según la casa fabricante [8].

Tabla 6 Características del recubrimiento Nitec [3][8]

Composición química	Ni+ 4%Fe, B, Si
Dureza (HV30)	200-240
Temperatura de fusión °C	1050 -1280
Densidad (g/cm3)	8.1
Temperatura de estabilización °C	Hasta 600
Propiedad de fricción metal-metal	Excelente
Resistencia a la corrosión	Muy buena
Maquinabilidad	Excelente, con herramientas de corte en buen estado
Materiales base recomendados	Aceros, fundiciones, aleaciones de níquel
Gases	Oxígeno y acetileno
Antorcha recomendada	Superjet Eutalloy

2.2.2 Metaceram 23075:

El recubrimiento Metaceram 23075 es una aleación de matriz metálica a base de níquel con agregado cerámico de carburo de tungsteno y cobalto que proporcionan buena dureza, resistencia a sollicitaciones de erosión-corrosión y una alta tenacidad. Posee un buen comportamiento como recubrimiento de barrera térmica y permite ser maquinado por herramientas estándar. Pese a su carácter cerámico, está configurado como un polvo fusible para ser depositado por la técnica de proyección en dos pasos. Su uso está destinado al recubrimiento de superficies con fuertes exigencias en su resistencia al desgaste en medios erosivos-corrosivos, y por tanto puede ser empleado en la manufactura de componentes como técnica de acabado superficial o en tareas de reparación. Se emplea con frecuencia en superficies de aspas de ventiladores industriales, separadores de ceniza y equipos de bombeo con presencia de sólidos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En la tabla 7 se aprecian las características principales del recubrimiento Metaceram 23075.

Tabla 7 Características del recubrimiento Metaceram 23075 [3][9]

Composición química	44Ni + 40WC/Co + 9.3Cr + 1.9B 2.1Fe + 2.3Si + 0.4C
Dureza (HV)	690
Resistencia al desgaste por erosión abrasin	Excelente
Resistencia a la corrosión	Muy buena
Maquinabilidad	Buena, con herramientas de corte en buen estado
Materiales base recomendados	Aceros, aleaciones de níquel y fundiciones de hierro gris
Gases	Oxígeno y acetileno
Antorcha recomendada	Superjet Eutalloy

2.3 Preparación de la superficie

La preparación de superficie del metal base es uno de los factores más importantes en el éxito o fracaso del proceso de la proyección térmica. La calidad de la adhesión del recubrimiento está directamente relacionada con la limpieza y rugosidad de la superficie del sustrato. El uso debido de los procedimientos para preparar la superficie del sustrato es necesario para asegurar la aplicación exitosa de la capa de rociado térmico. El material de recubrimiento y el tipo de sustrato son los principales factores que determinarán que tipo de preparación de la superficie es necesaria para lograr una unión consistente.[25]

Un proceso usual es recubrir rápidamente la superficie luego de haberse preparado, a menos que el recubrimiento se aplique inmediatamente después de la preparación, sin manipulación intermedia. Una pieza puede ser preparada y dejada en espera, únicamente si se protege bien de la humedad y otros contaminantes. De igual modo, no deben producirse cambios drásticos de temperatura que puedan generar condensación

en la superficie. En partes mecánicas que son sometidas a grandes esfuerzos, una inspección previa al recubrimiento es necesaria para detectar fallas en la base del metal. Esto se hace utilizando métodos de inspección no destructivos. Las fallas en la parte estructural pueden producir fallas similares en el recubrimiento. Las grietas del sustrato no son reparadas por la proyección térmica.

2.3.1 Limpieza y Manejo

El primer paso en la superficie a rociar térmicamente, es remover todas las partículas contaminantes que en ella se encuentren, tal como aceites, grasa y pinturas. El calor de la proyección térmica no quitará los contaminantes, y estos a su vez inhibirán la unión con inclusiones y óxidos.

Después de remover todos los contaminantes, la limpieza de la pieza debe mantenerse hasta completar el ciclo de rociado. Entre estos procesos de limpieza se puede encontrar la utilización de: procesos de vaporizado (Desengrasante o Abrasivo), baños químicos, procesos de horneado, limpieza ultrasónica, entre otros. [25]

2.3.2 Rugosidad

Después de la limpieza, se usa un método severo para producir una superficie ideal a la cual se pueda adherir el recubrimiento. Los principales métodos son:

1. Granallado.
2. Pulidora.
3. Chorro de arena.

A menudo se usan combinaciones de estos métodos, debido a que se necesita una rugosidad apropiada para asegurar una buena adhesión entre el sustrato y el recubrimiento.

La rugosidad adecuada en la superficie del substrato sirve para:

- Proveer una superficie compacta y fuerte.
- Otorgar capas de agarre.
- Incrementar el área de agarre.
- Descontaminar la superficie.

2.3.2.1 Chorro de Arena

La arena abrasiva proyectada (Sand-blasting o chorro de arena), es el método comúnmente utilizado en la generación de rugosidad. La superficie a recubrir es impregnada uniformemente por las partículas abrasivas.

La calidad del acabado depende del tamaño y tipo de abrasivo. Partículas duras y angulares proveen excelentes resultados. Todo el abrasivo debe estar limpio, seco, libre de aceites, u otros contaminantes. La apropiada selección de un desbaste medio depende de la dureza del substrato.[25]

Los abrasivos más utilizados son:

- Óxido de aluminio.
- Hierro templado.
- Acero angular.
- Carburo de silicio.
- Granate.

La diferencia principal con el granallado, como lo dice su nombre, es usada comúnmente granallada metálica (partículas de acero, hierro, etc) y varían los tamaños de partícula según la rugosidad superficial necesaria.

2.4 Ensayos mecánicos y desgaste

2.4.1 Desgaste

Las superficies de los materiales desempeñan papeles muy importantes en la tecnología, estas funciones pueden ser puramente decorativas como acabados finos o pueden ser para fines industriales como generar capas de protección, ya sea como barreras térmicas, anticorrosivas, antidesgaste entre otras. Como el objetivo de la investigación es estudiar el comportamiento del desgaste abrasivo y adhesivo, se profundizará en ambos tipos de desgaste. Según la norma DIN 50320 [69] el desgaste se define como la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido.

Según Peterson, M. B [63] y Saltzman, G. A [64] el desgaste se puede clasificar en dos grandes grupos, de alto y bajo esfuerzo. Además se evidencia en la norma ASTM G65 – 04 [4].

La abrasión de baja tensión se caracteriza por una tensión impuesta sobre las partículas abrasivas que no superen su resistencia a la compresión [65]. Es una forma de desgaste que se produce en muchas aplicaciones industriales importantes, incluyendo el movimiento de tierras, el transporte de mineral, y el bombeo de suspensión. La necesidad de ensayos de desgaste fiables para clasificar a las aleaciones de acuerdo a su resistencia a la abrasión de baja tensión, permite lograr un medio para la selección de la aleación.[21]

Se han diseñado unas pruebas mediante una máquina según la norma ASTM [8] para determinar este tipo de abrasión, Borik, F. [67] dividió en tres las categorías.

La primera categoría incluye las máquinas que tienen especímenes girando o rotando a través de un chorro de arena.

La segunda categoría consta de un mecanismo en el cual la abrasión es producida por partículas sólidas transportadas por aire que golpean las muestras fijas.

Y la tercera categoría incluye a los equipos que constan de una rueda de goma que gira con un chorro de arena seca como abrasivo y frotando contra un espécimen estacionario.

En detalle se define el desgaste como el daño que sufre un cuerpo sólido a un movimiento relativo entre la superficie y los cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos con los cuales se encuentra en contacto [68].

Las aplicaciones para recubrimientos por proyección térmica pueden categorizarse como desgaste adhesivo, desgaste abrasivo o fatiga superficial. Los diferentes tipos de desgaste se aprecian en la figura 2.13.

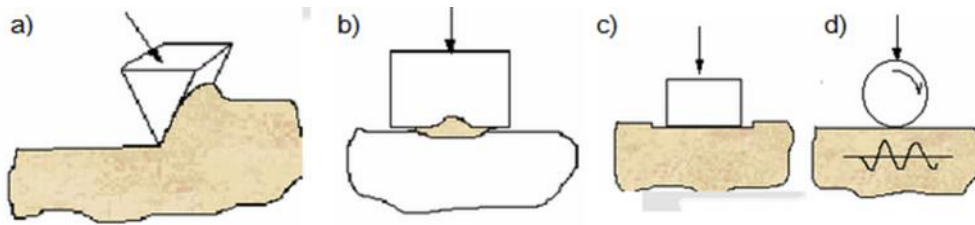


Figura 2.13 Mecanismos de desgaste, a) Abrasivo, b) Adhesivo, c) y d) Fatiga superficial.[70]

A continuación se mencionaran diferentes mecanismos de desgaste y la identificación de cada uno de ellos.

2.4.1.1 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies se deslizan una con la otra con el movimiento previsto produciendo fragmentos de una superficie que se adhiere a la otra.

Por lo general ocurre cuando la lubricación no es suficiente y los resultados en la transferencia de metal, generalmente se llama “galling” que traduce rozadura [21][69].

En la figura 2.14 se muestra un ejemplo de desgaste adhesivo sobre una superficie. Se identifica porque hay deformación plástica de la superficie desgastada, por ende deja una hulla más pronunciada que otros mecanismos de desgaste [21, 71, 74].

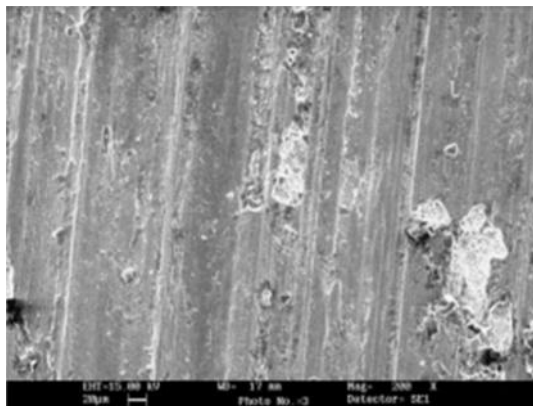


Figura 2.14 Ejemplo de desgaste adhesivo sobre una superficie plana [71]

Existen dos formas de desgaste adhesivo: cuando la pieza es más blanda que el elemento abrasivo o cuando la pieza es más dura que el elemento abrasivo. Los ejemplos que muestran estos casos son cuando un rodamiento es más duro que la carcasa recubrimientos blandos en cojinetes, o cuando un rodamiento es más blando que la carcasa recubrimientos duros en cojinetes. [21]

2.4.1.2 Desgaste abrasivo

Según la Norma ASTM G40-92, el desgaste abrasivo es la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras forzadas a moverse contra y a lo largo de una superficie sólida [69].

Este tipo de desgaste ocurre como resultado del contacto dinámico entre superficies sólidas y fragmentos o partículas abrasivas. Ya que los fragmentos más comunes y abundantes son la tierra y sus derivados; el desgaste abrasivo es el mayor problema

para la excavación, movimiento de tierra, minería, y procesos mineros industriales y ocurre en una variedad de equipos, tales como: hojas de buldócer, dientes de excavadoras, brocas para rocas, trituradoras, molinos de bolas, molino de barras, canaletas, bombas de lodo, y los ciclones. El cambio o reparación de estas piezas en los tiempos muertos genera un alto costo para la industria [68].

2.4.1.2.1 Categorías del desgaste abrasivo

Al momento del contacto entre dos superficies, ambas zonas sufren desgaste, generando mayor daño a la más blanda por lo tanto se considera a la superficie más dura como abrasiva [70], el desgaste abrasivo de acuerdo al tipo de contacto se puede clasificar en abrasión a dos y tres cuerpos:

- Abrasión de dos cuerpos: Protuberancias de una superficie dura se presionan contra un cuerpo más suave, en la figura 2.15 se aprecia una microscopía de barrido de la abrasión a dos cuerpos [71].

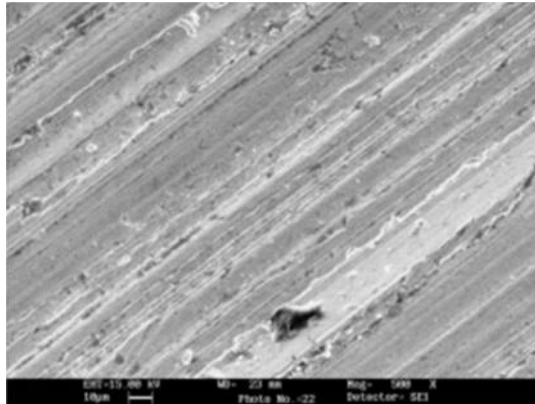


Figura 2.15 Desgaste abrasivo de dos cuerpos [71]

- Abrasión de tres cuerpos: cuando partículas duras se encuentran atrapadas entre dos superficies más blandas, de modo que la fuerza aplicada se

transmite a través de las partículas abrasivas. En la figura 2.16 se observa un ejemplo de abrasión a tres cuerpos [21] [72].

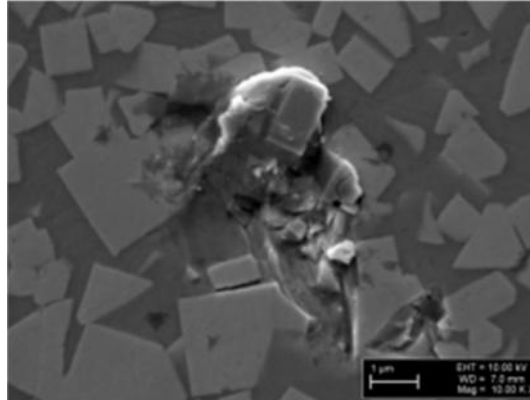


Figura 2.16 Desgaste abrasivo a tres cuerpos [72]

Hay 4 tipos de abrasión y dependen del nivel del daño sufrido en el material, se clasifican de la siguiente manera de menor a mayor daño [73]:

- Pulido: Es el menor desgaste, se caracteriza por la suavidad de la superficie donde la abrasión es muy fina, el material se remueve por medio de frotamientos contra otras superficies, el rayado es poco visible y no hay fractura ni deformación plástica.
- Abrasión de bajo esfuerzo : se conoce también con el nombre de rayado, es el desgaste que ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos, se denomina de bajo esfuerzo ya que las cargas son lo suficientemente bajas de tal modo que las partículas no se desintegre o se rompan. Generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación de la superficie es mínima [21, 64, 74]. Como las huellas se asemejan a las dejadas por un tractor cuando labra la tierra, también se conoce como desgaste por arado.

- Escarnado: Se refiere a la remoción de material debido a la acción repetitiva de altas cargas compresivas producidas por partículas grandes como rocas, dejando a su paso grandes surcos en la superficie. [73]
- Abrasión de alto esfuerzo: desgaste donde la fuerza aplicada es lo suficientemente alta como para triturar las partículas. El daño se caracteriza por la deformación plástica, rayado y picado del material, debido a las partículas presionadas sobre el cuerpo.

La Ecuación de *Archard* [75] es una de las más comunes para el estudio del fenómeno abrasivo bajo las consideraciones mencionadas, a pesar de que fue elaborada inicialmente para estudiar el desgaste tipo adhesivo. Cuando un grano abrasivo efectúa remoción de material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse viene dado por la ecuación (2): [76] [77].

$$W = A \cdot d \quad (2)$$

Donde:

- W es el volumen de material removido
- A es la sección transversal de la ranura
- d es la distancia de desplazamiento.

A la vez, la sección transversal de la ranura A , depende de la forma del grano abrasivo (representado por el factor k_1 y de la profundidad de la penetración p , es decir, $A = k_1 \cdot p$). La profundidad de penetración es función de la carga aplicada L , la dureza del material H y nuevamente de la forma del grano abrasivo k_2 , es decir, $p = \frac{k_2 \cdot L}{H}$. Dando por resultado, luego de simplificar algunos términos, que la Ecuación de *Archard* [75] [77] sea la ecuación (3):

$$W = k_3 \cdot \left(\frac{L \cdot d}{H} \right) \quad (3)$$

Donde k_1 y k_2 se combinan para obtener k_3

Cabe señalar que existen muchos factores que afectan a k_1 , por ejemplo que estemos en presencia de corte o arado, el abrasivo puede deslizar y evitar el desgaste, por derrumbamiento puede no ser efectivo, durante el final de su trayectoria de contacto, etc.

Por lo general un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando este se refiere al recíproco del volumen desgastado; entonces obtenemos la ecuación (4) [77]:

$$R = \frac{1}{w} \quad (4)$$

La ecuación de *Archard* con pequeñas modificaciones es aún ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más completas.

Los factores que afectan las pérdidas por abrasión son:

- Abrasivos: los abrasivos son los elementos que debido a su elevada dureza y estructura cristalina producen un desgaste o corte, por acción mecánica sobre materiales menos duros que ellos. Los abrasivos pueden clasificarse en: naturales que son los que se hallan en la naturaleza (corindón, cuarzo, diamante, esmeril y óxido de aluminio) y artificiales que son los producidos por reacciones químicas en procesos industriales.
- Granulometría: los abrasivos tanto naturales como artificiales son reducidos a polvo mediante máquinas trituradoras de las cuales salen con diversas dimensiones. Los abrasivos pueden clasificarse en función del tamaño de grano, para separarlos se emplean procesos de tamizado para los granos gruesos y sistemas de decantación para los más finos.
- Forma: es un factor de gran importancia cuando se habla de efectos de desgaste, ya que afecta la forma de la huella producida en el material, al igual que la carga de contacto y la transición entre el roce elástico y el plástico. A medida que el grano abrasivo sea más redondeado menor será el desgaste ocasionado.

- Temperatura: la rata de desgaste abrasivo aumenta en función de la temperatura, ya que la dureza y el esfuerzo de fluencia disminuyen. Sin embargo, cabe anotar que materiales como el Cu y el Al no modifican de forma notoria su resistencia al desgaste a partir de los 400 °C. [63] [77]
- Velocidad de contacto: el desgaste abrasivo aumenta cuando la velocidad se incrementa en el rango de 0 a 2,5 m/s. Este aumento se puede atribuir al calentamiento que ocurre en la superficie del material debido a la fricción.
- El recubrimiento debe ser duro. En particular, la dureza de la superficie debe superar la dureza de los granos abrasivos presentes.
- El abrasivo más común es la sílice (arena), con una dureza de aproximadamente 820 HK. (En comparación, carburo de tungsteno / cobalto compuesto es 1400 a 1800 HK; Al₂O₃ es de aproximadamente 2,100 HK) [78][21]
- Carga: a partir de la ecuación de *Archard* se puede ver que el desgaste es proporcional a la carga, pero esto se cumple sólo hasta el punto en el cual la carga sea capaz de fracturar el material abrasivo.
- En función de la fractura del material abrasivo se pueden presentar dos situaciones: se pueden generar nuevos granos filosos que acentúan el desgaste o se pueden formar pequeñas partículas redondeadas que lo desfavorecen.
- Humedad: el efecto de la humedad aún no se ha aclarado de forma satisfactoria, ya que en dos procesos experimentales distintos otorgó resultados contradictorios.
- Corrosión: la abrasión, por lo general, se favorece con la corrosión, especialmente si el PH reinante es bajo. Cuando esto ocurre la abrasión crea superficies “frescas” que rápidamente son corroídas, la capa corroída es removida por el efecto abrasivo y se forma así una nueva capa fresca para

reanudar el ciclo, adicionando polvo corrosivo como material abrasivo luego de cada ciclo.[77]

2.4.1.2.2 Medidas de desgaste abrasivo

La forma más común de daño superficial es la pérdida o desplazamiento de material, por lo tanto el volumen puede ser usado como medida de desgaste [81].

Para propósitos científicos el volumen es frecuentemente la medida para cuantificar este proceso, aunque en algunos casos solo se utiliza la pérdida de masa por su facilidad de medición. Actualmente esta unidad de cuantificación no se puede considerar como medida primaria o directa para el desgaste, debido a varios inconvenientes que se presentan con las propiedades de los materiales y con la geometría de la pieza, como son la densidad de los materiales que no siempre es constante y que la medida de la masa no mide directamente el material desplazado. [21][82]:

Puesto que en aplicaciones de ingeniería lo más importante está relacionado con la pérdida de dimensiones o el cambio en la geometría del elemento, la unidad más utilizada para cuantificar el daño a la superficie, es el volumen. Estos cambios y la pérdida de volumen se relacionan a través de la geometría del surco, teniendo en cuenta que no siempre la relación entre volumen y dimensión de desgaste es necesariamente lineal.[21]

Debido a estos criterios existen diversos ensayos para medición del desgaste, algunos no son estandarizados, pero en general para determinar cuál es el mejor tipo de ensayo se debe tener claro, que el que sea seleccionado simule lo más fielmente posible las condiciones reales a las que la pieza será sometida [83], de modo que se hace necesario tomar un ensayo estandarizado.

Para esta investigación los ensayos de abrasión se hicieron bajo la norma ASTM G65 y siendo que el comportamiento es de abrasión por baja tensión, [65][64]. Este método

cubre cinco pruebas recomendados los cuales son apropiados para específicos grados de resistencia al desgaste o espesores del recubrimiento [4].

- Prueba 1: Este es relativo a ensayos rigurosos que colocan a los materiales metálicos en un rango de pérdida de volumen desde baja a extrema resistencia a la abrasión. Este es particularmente usado en el rango de materiales de media a extrema resistencia a la abrasión.
- Prueba 2: Una variación de la Prueba 1. Este puede ser usado para materiales altamente resistentes a la abrasión, pero es particularmente usado en materiales en el rango de media a baja resistencia a la abrasión. Debe ser usado cuando los valores de pérdida en volumen desarrollados por la Prueba 1 exceden los 100 mm³.
- Prueba 3: Una variación de corto alcance de la Prueba 1 para uso en capas delgadas.
- Prueba 4: Esta es una variación de la Prueba 1 para cargas suaves, el cual es particularmente usado en materiales en el rango de baja resistencia a la abrasión.
- Prueba 5: Variación corta de la Prueba 2 que es usada en materiales con media o baja resistencia a la abrasión.

La Prueba seleccionada es la 2, debido a que la literatura hace referencia a este como el más usado para este tipo de recubrimientos[21][84]. Para realizar las pruebas y el análisis de resultados se utilizó como referencia los estudios hechos por [17, 21, 85, 86] Fang L., Hincapie W., Gore G. y Hutchings I. respectivamente. Quienes trabajaron con la norma ASTM G65 [4]; además se tuvo en cuenta el trabajo hecho por Ruff A. en conjunto con la ASM [87] donde se relaciona la geometría de la huella dejada por las partículas de arena contra el disco abrasivo como se observa en la figura 2.17.

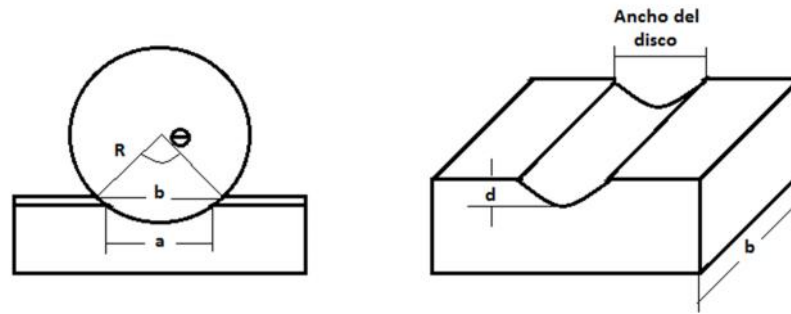


Figura 2.17 Geometría de la huella dejada para calcular el volumen perdido [83, 88]

Donde:

R es el radio de la rueda

b es el largo de la huella del recubrimiento

a es el largo de la huella del sustrato

θ el ángulo de la huella de la sección removida.

Analizando las variables de la figura 2.17 se obtienen las siguientes ecuaciones;

Para calcular el ángulo θ se usó el teorema del coseno según la ecuación 5:

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{a^2}{2R} \right) \quad (5)$$

Luego se calcula el área de la sección θ en la ecuación 6:

$$Area_seccion = \frac{\theta}{2} R \quad (6)$$

y se resta el área del triángulo en la ecuación *:

$$Area_triangulo = \frac{a}{2} * \sqrt{R^2 * \left(\frac{a}{2} \right)^2} \quad (7)$$

quedando el área de la sección removida según la ecuación 8:

$$Aseccion = \frac{\theta}{2} R - \frac{a}{2} * \sqrt{R^2 * \left(\frac{a}{2} \right)^2} \quad (8)$$

Finalmente, el volumen removido se calculó con el área y el espesor e como vemos en la ecuación 9.

$$\text{Volumen} = \text{Aseccion} * e \quad (9)$$

Los cálculos se hicieron en Tablas de Excel y por software de diseño para corroborar el volumen desplazado [21].

2.4.1.3 Desgaste por fatiga

Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir a la formación de grietas, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultaran en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos. La forma y distribución de estos campos de esfuerzo se hallan influenciadas por la geometría de contacto, las propiedades elásticas y plásticas de los materiales y la intensidad de las cargas normales y tangenciales aplicadas en estas regiones, existen dos tipos de grietas: superficiales y subsuperficiales.

Las grietas superficiales se presentan debido a defectos como indentaciones, irregularidades del proceso de mecanizado del material e inclusiones. Las grietas subsuperficiales pueden existir al interior del material debido a la presencia de inclusiones y de defectos cristalinos. Si las grietas subsuperficiales se propagan paralelas a la superficie se producen placas del material lo que origina delaminación [80].

2.4.2 Deslizamiento en seco mediante Pin on Disk

Con la finalidad de medir la huella dejada por el ensayo de desgaste por deslizamiento en seco “pin-on-disc” además de basarse en la norma ASTM G99 [91] que son los

estándar normalizados para realizar las pruebas de pin on disk; se usó la metodología realizada por Nair R. y colaboradores [14], M.G. Gee y colaboradores [89], y F. Suárez y colaboradores [90], las cuales se basaron en el modelo de *Archard*, que como habíamos visto en anteriormente en la ecuación (3), nos sirve para calcular el volumen desplazado para los materiales monolíticos o de pruebas en las que el recubrimiento no se rompe por la carga. Para estos efectos se usa la ecuación (10) del volumen desplazado y el diagrama esquemático de la prueba pin on disk se aprecia en la figura 2.18:

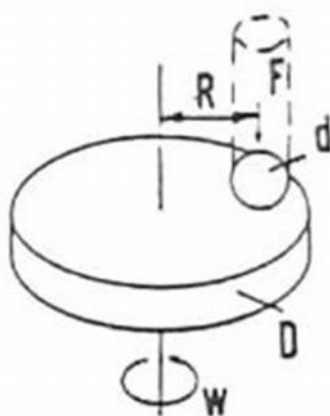


Figura 2.18 Diagrama esquemático prueba pin on disk según la norma ASTM G99 – 04 [91]

Donde:

R es la distancia del centro de la probeta al centro de la esfera, que equivale al radio de la huella dejada por la prueba.

F es la carga normal aplicada

d es el diámetro de la esfera del pin.

D es el diámetro del disco

W es la velocidad de rotación.

Con el fin de calcular la pérdida de volumen cuando el pin es esférico de radio R y el disco es plano y su superficie perpendicular al pin [91]; teniendo como base el hecho de que solo alguno de los dos fue significativamente desgastado; [89, 93] como lo mencionamos anteriormente obtenemos la ecuación 10:

$$V = \frac{\pi * b^4}{64 * R} \quad (10)$$

Donde:

V es el volumen desplazado

b^4 es el ancho de la huella elevado a la cuarta potencia

R el radio de la esfera

La anterior relación asume que la forma de la huella es conforme a la forma de la esfera. Esta suposición se ha demostrado que es verdad en muchos casos. Y según la ley de Archard de desgaste, la tasa de desgaste K se obtiene con la ecuación 11 ,

$$K = \frac{V}{S * N} \quad (11)$$

Donde:

S es la distancia recorrida y N es la carga.

El desgaste generado será dependiente de la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el ambiente y las propiedades del material. Teniendo en cuenta lo anterior, las características típicas del ensayo pin on disk se nombran a continuación [92][93]:

- La rugosidad promedio de la superficie debe ser de 0.8 μm o menos es más recomendado.
- La esfera del pin tiene diámetros del rango de 2 a 10 mm.
- El diámetro típico del disco es de 30 a 100 mm y tiene un espesor en el rango de 2 a 10 mm.
- La cantidad de desgaste es determinada por medición de dimensiones lineales apropiadas del pin y del disco, antes y después del ensayo.
- Los resultados de desgaste son reportados como volumen perdido en milímetros cúbicos para el pin y el disco separadamente.

- También se puede determinar por peso de ambos antes y después del ensayo.

Debido a que la pérdida de masa es muy pequeña en los casos en que el recubrimiento es muy duro como para obtener una medición precisa, pues aún pesando las superficies en una balanza con unidades del orden de las diez milésimas de gramo, no es posible determinar en algunos casos la pérdida de masa; por lo tanto se usa el coeficiente de fricción COF y la rugosidad promedio en algunos casos especiales [93][14]. Si es medida la pérdida de masa, el valor de pérdida de masa es convertido a volumen perdido conociendo la densidad del material de la muestra. Los resultados de desgaste se reportan como graficas de volumen de desgaste contra distancia de deslizamiento usando diferentes muestras para diferentes distancias [91].

Ahora bien si se asume desgaste insignificante del disco la ecuación (12) para determinar la pérdida de volumen es:

$$V = \frac{\pi h}{6} \left[\frac{3d^2}{4} + h^2 \right] \quad (12)$$

Donde:

V es la pérdida de volumen del pin en mm^3

d es el diámetro de la marca desgastada.

r es el radio de la punta del pin

Y h es despejado en la ecuación (13):

$$h = r - \left[r^2 - \frac{d^2}{4} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Contrariamente si se asume desgaste insignificante del pin, obtenemos la Ecuación 14 [93] :

$$V = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) (4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad (14)$$

Donde:

V es la pérdida de volumen del disco en mm³.

R es el radio de la pista de desgaste

d es el ancho de la pista de desgaste

Cabe aclarar que en algunos casos será posible determinar el volumen perdido mediante otros métodos nombrados a continuación:

- Usando un analizador de imágenes se deben medir las huellas de desgaste; estas mediciones deben ser hechas por lo menos en dos ubicaciones representativas en las superficies del pin y el disco y los resultados finales promediados.
- Cuando el pin y el disco sufren un desgaste muy significativo, será necesario medir la profundidad del perfil desgastado en ambos miembros. Para realizar esta acción existen métodos como la perfilometría o la microscopía confocal, que se convierten en métodos de aproximación para determinar la forma final exacta de las superficies desgastadas y de este modo calcular el volumen de material perdido debido al desgaste.
- Cuando el desgaste es significativo en el disco, el promedio del perfil de la pista de desgaste puede ser integrado para obtener el área de sección transversal de la pista y multiplicado por la longitud promedio de pista para obtener el volumen desgastado del disco aproximado.
- Cuando el desgaste es significativo en el pin, el perfil de la marca de desgaste puede ser medido en dos direcciones ortogonales, los resultados del perfil promediados, y usados en una figura de revolución calculada para el volumen

de desgaste del pin mediante integrales por elementos finitos o utilizando ecuaciones de mecánica del medio continuo.

- El COF o coeficiente de fricción, debe ser reportado si está disponible, describiendo las condiciones asociadas con las mediciones de fricción.
- Cuando se ensaya el material se debe reportar el tipo de material, forma, tratamientos, acabado superficial, y procesos de preparación de las muestras, si es apropiado, reportar la dureza; esto ya que varían las densidades según el material arrojando datos erróneos de volumen. [93]

2.4.3 Rayado o “scratch test”

La prueba de rayado determina, principalmente, el nivel de adhesión y cohesión que tiene el recubrimiento sobre el sustrato. La adhesión es uno de los parámetros más importantes que influye en el desarrollo de recubrimientos depositados por la técnica de proyección térmica como se observó en capítulos anteriores. Por lo tanto, para determinadas aplicaciones debe ser conocido el nivel de adherencia [94].

Técnicamente la adherencia de los recubrimientos por proyección térmica, es atribuible al enlazamiento mecánico de las partículas y a la difusión localizada. La eficiencia de la transferencia del calor de la llama a la partícula depende del tamaño y la forma de ésta. Dichas variables pueden ser controladas mediante el proceso de fabricación adecuado, siendo éstos los parámetros más importantes que determinan la calidad de una aleación micro pulverizada. La partícula debe tener un diámetro nominal preestablecido para el tipo de sistema que se va a usar. Para un sistema de alto poder calorífico una partícula de diámetro nominal inferior al requerido, implica una excesiva transferencia de calor por unidad real superficial, produciéndose oxidación por alta temperatura. Partículas de diámetro nominal mayor al requerido no absorberán suficiente calor y no lograrán plastificarse, ni fundirse, impidiendo el enlazamiento mecánico. [95]

Con el paso de los años el ensayo de rayado ha sido el modelo para medir la adhesión y cohesión entre sustratos y recubrimientos [96]. Con el fin de entender mejor estos

términos se explicaron en capítulos anteriores, sin embargo se recordarán los términos resumidos a continuación:

- Adhesión: Se refiere a la habilidad del recubrimiento o revestimiento para permanecer unido al sustrato en condiciones de servicio y sin degradación en el tiempo [97]. Estrictamente la adherencia es una propiedad asociada a la interface entre el sustrato y el revestimiento y depende de unión a nivel atómico o del anclaje mecánico entre ambos [21].
-
- Cohesión; es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo. En los sólidos, las fuerzas de cohesión son elevadas en las tres direcciones espaciales. Cuando aplicamos una fuerza solo permite pequeños desplazamientos de las moléculas entre sí, cuando cesa la fuerza exterior, las fuerzas de cohesión vuelven a colocar las moléculas en su posición inicial. [98]

Las fallas cohesivas dependen de las propiedades estructurales de los materiales del recubrimiento-sustrato, es decir las fuerzas de cohesión son las que permiten la atracción entre moléculas que mantiene unidas los recubrimientos. [78]

Ahora que se comprendió de que tratan las fuerzas que se determinan en las pruebas de rayado, se puede explicar detenidamente en qué consiste y como se aplica dicha prueba en la investigación. La prueba de rayado consiste en generar una ralladura con una punta, que normalmente es de diamante o WC, en un área seleccionada de la superficie recubierta bajo carga constante, incremental o progresiva [100]. En cierta carga crítica el recubrimiento empieza a fallar. Las cargas críticas normalmente son detectadas de manera precisa por medio de un sensor acústico y pueden ser confirmadas con observaciones en un microscopio óptico [93]. En la figura 2.19 se aprecia el esquema de la prueba de rayado.

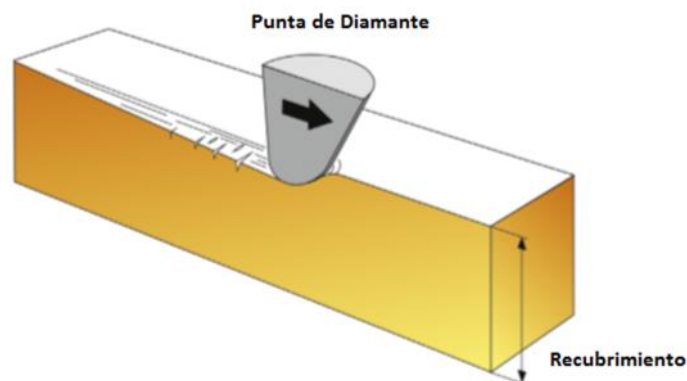


Figura 2.19 Esquema de la prueba de rayado [101]

Los datos de carga crítica son usados para cuantificar las propiedades adhesivas de diferentes combinaciones película-sustrato. Además de la emisión acústica, también se puede medir la fuerza normal aplicada, la fuerza de fricción tangencial y la profundidad de penetración. Estos parámetros junto con la información de emisión acústica proveen las propiedades mecánicas del sistema [93].

Este método da lugar a una medida práctica de adherencia del sistema recubrimiento sustrato que depende de las propiedades y geometría del indentador, la tasa de carga, la tasa de desplazamiento y de las propiedades recubrimiento sustrato (dureza, módulo de elasticidad, mecanismo de falla, micro estructura, rugosidad superficial).

Los niveles específicos y tipos de daño progresivo en la huella de rayado se asocian con la carga aplicada. La carga normal aplicada que produce un daño específico se define como carga crítica de rayado y para un sistema recubrimiento-sustrato específico, una o más cargas críticas diferentes pueden ser definidas para niveles progresivos de daño del recubrimiento. El daño del recubrimiento es observado por microscopio óptico o microscopio electrónico de barrido durante el ensayo o después de que sea finalizado [93].

La prueba de rayado no es un buen sustituto para medir la adhesión de recubrimientos blandos. Existen varias normas para hacer esta prueba, como por ejemplo la ASTM C1624-05, ASTM C633-79 y la DINEN1071-3 [100][102][103].

En estas normas se detalla un atlas de las posibles fallas que se puedan presentar siendo más clara en al ASTM C1624-05. [21]

Debido a que la prueba de rayado se aplica a capas delgadas, y los espesores obtenidos por la técnica de proyección térmica son mucho mayores que las capas delgadas, hacer un ensayo según la norma ASTM C 633 - 79 no serviría, además de tener algunos inconvenientes, debido a un complejo montaje experimental y la necesidad de un pegamento con alta resistencia de adherencia por esto se usa la ISO/WD 27307 [106]. Además, se podría dañar el equipo, por esto se tomó este tipo de montaje que se basó en los ensayos hechos por Vencl A y colaboradores [105].

En la figura 2.20 se observa cómo se mide el triángulo proyectado y los tipos de triángulos que identifican las fallas cohesivas y adhesivas de la prueba de rayado sobre la sección transversal de la muestra [104, 100] y no sobre la superficie del recubrimiento. Esto es debido al grosor de las capas y la alta rugosidad que presentan.

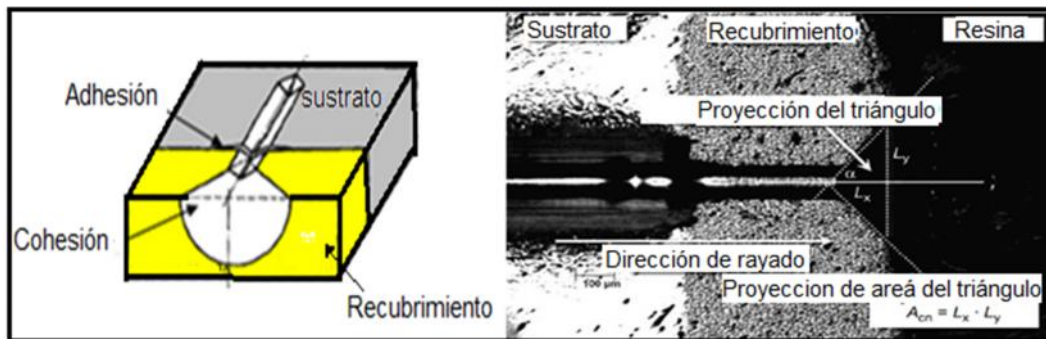


Figura 2.20 Formas de las posibles fallas en la prueba de rayado transversal y área de cono [105]

Este método consiste en “rayar” la sección transversal de la muestra recubierta, con varios niveles de carga constante moviéndose desde el sustrato, a través del recubrimiento hasta la resina en donde se encuentra la muestra. Cuando el indentador deja el recubrimiento y penetra en la resina, usualmente se genera una fractura en forma de cono, la cual es mostrada en la figura 2.20 el tamaño del cono es una medida de la cohesión del recubrimiento [105]

Como se ve en la figura 2.13 existen dos tipos de fallas que pueden ocurrir, adhesiva y cohesiva [70]. De modo que la calidad del recubrimiento se determina principalmente con

la resistencia de los enlaces de adherencia. Esta falla sucede en la interface recubrimiento-sustrato, mientras la fuerza de cohesión indica el comportamiento del recubrimiento al desgaste, y sucede en la superficie del recubrimiento y se mide con la proyección del área del triángulo formado, y para calcularla se usa la ecuación 15 [21] [105, 107].

$$A = Lx \cdot Ly \quad (15)$$

Donde:

A es el área del triángulo

Lx es la altura del triángulo rectángulo

Ly es la base del triángulo rectángulo

2.4.4 Dureza

La medida principal para comparar materiales, y una de las primeras que se aprenden a medir sobre una superficie metálica es la evaluación de la dureza, que es una medida de la capacidad de una superficie para resistir la deformación plástica; o como la resistencia a la penetración o al rayado [78]. En la figura 2.21 se observa un durómetro digital para mediciones Rockwell con punta de diamante. [109]



Figura 2.21 Durómetro Rockwell digital CV600MB [109]

La distribución de tensiones por debajo de un indentador depende de su forma, pero la dureza es esencialmente una medida de la tensión de fluencia [108]. Un requisito importante para ensayos de dureza en recubrimientos hechos por proyección térmica es que el espesor del revestimiento debe ser al menos cuatro veces la profundidad de la indentación por lo que se utilizan cargas livianas (por lo general menos de 15 g) [99], que hacen que el tamaño de la indentación sea difícil de medir. Por lo tanto, la topografía de la superficie de la muestra también se vuelve importante; a menudo se tiene que pulir el espécimen para obtener un área razonable y poder hacer las mediciones de dureza. En la figura 2.22 se aprecian las diferencias entre las micro mediciones en Grados Knoop (a) y Vickers (b).

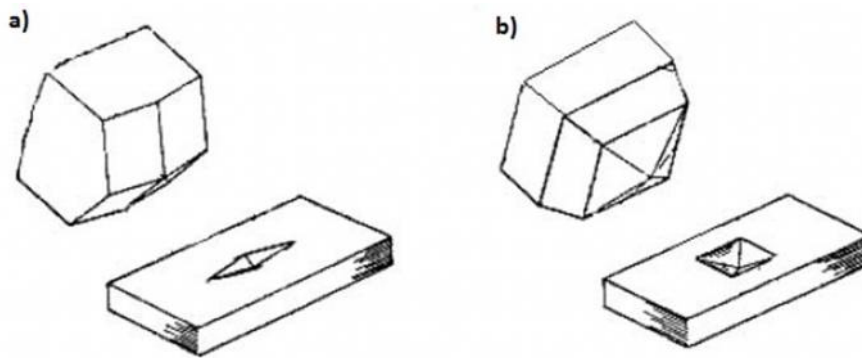


Figura 2.22 Comparación entre las microindentaciones en grados Knoop (a) y Vickers (b) [110]

También se debe tener en cuenta que los revestimientos son generalmente altamente texturizados y los valores de la dureza pueden variar significativamente con la dirección de las mediciones que se realicen. El ensayo de dureza que se adoptara es el Knoop, o microindentación Knoop bajo la norma ASTM E384 [53] [99].

2.5 Métodos de Caracterización de materiales

2.5.1 Difracción de Rayos X (DRX, XRD)

La técnica de difracción de rayos X hace posible la caracterización estructural y microestructural detallada de láminas delgadas. Esto quiere decir que es posible conocer las posiciones que ocupan en el espacio los átomos, iones o moléculas que conforman un material. Este ordenamiento junto con las periodicidades y simetrías que implican, son los que determinan las propiedades físicas y químicas que presentan los materiales. [111]

Esta técnica se usa para caracterizar materiales cristalinos. Los análisis de los espectros de difracción brindan información acerca del parámetro de red, distancia interplanar, tamaño del cristalito, fases presentes, proporción relativa de las fases, orientaciones cristalinas preferenciales (textura cristalográfica), tensiones residuales, microtensiones y microdeformaciones. [21]

Esta técnica se basa en la ley de Bragg, gracias a los estudios del físico premio Nobel Australiano William Laurence Bragg y su padre [112]; quien observó que las sustancias cristalinas dan lugar a patrones de rayos X reflejados muy característicos y con picos intensos cuya intensidad depende fuertemente de la longitud de onda y de la orientación del cristal con los rayos X [111].

Ésta ley plantea que los Rayos X incidentes sobre una muestra cristalina producirán difracción de éstos cuando se cumple la ecuación 16:

$$n = 2d \sin(\theta) \quad (16)$$

Donde:

λ es la longitud de onda de los Rayos X

θ es el ángulo de difracción, medido con respecto a los planos de difracción como se aprecia en el esquema de la figura 2.23

d es la separación entre planos

n es el orden de reflexión

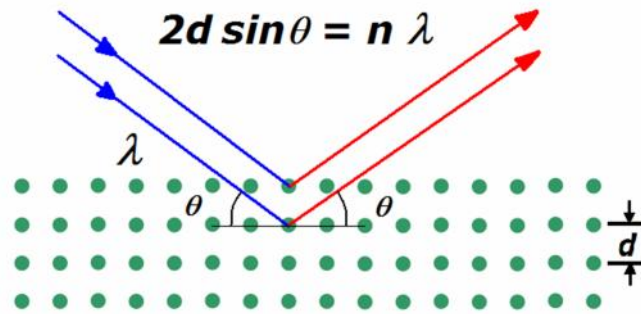


Figura 2.23 Esquema de difracción de rayos X o reflexión de Bragg. [113]

Los haces difractados están caracterizados por su posición angular respecto del haz incidente, el ancho de las líneas es utilizado para determinar la información del estado de la estructura cristalina (microdeformaciones y tamaño del cristal); las intensidades proporcionan información cuantitativa de compuestos cristalinos y miden la textura cristalográfica. Esta información se presenta en un gráfico de intensidad en función del ángulo 2θ , llamado Diagrama de Difracción [113][80].

2.5.2 Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX, XRF):

El proceso de fluorescencia consiste en la desexcitación radiativa de una electrón que cae desde un nivel de alta energía a un hueco situado en un nivel de menor energía [111]. Una fuente de rayos X se utiliza para irradiar la muestra que causa que los elementos de la muestra emitan sus propios rayos X característicos. Un detector en el sistema se utiliza para medir las posiciones de los picos de fluorescencia de rayos X para

cualificar la identificación de los elementos presentes, y para medir las intensidades de los picos para la determinación cuantitativa de la composición.

Todos los elementos, con excepción de los elementos livianos entre otros los elementos transuránicos pueden ser detectados. Se caracteriza por ser una prueba no destructiva ya que hace incidir el rayo X sobre el material sin afectar su estructura externa o interna, así mismo éste incide en un átomo del material y de esta forma es absorbido o dispersado [21][114].

Si es absorbido, el átomo afectado transfiere su energía a un electrón de la capa interna y ya que tiene un alto valor de energía aportado, el electrón será emitido. El desequilibrio ocasionado por la emisión del electrón, hace que electrones de otras capas ocupen el lugar de vacancia que éste ha dejado, generando un rayo X característico. [114] Dado que cada elemento existente tiene niveles de energía únicos, los rayos X emitidos también tienen energías únicas que permiten detectar el elemento. Las capas k y l son comúnmente analizadas por medio de esta técnica a excepción de algunos elementos livianos como ya lo nombramos. Para comprender mejor el principio de esta técnica en la figura 2.24 se aprecia el proceso de difracción de rayos x [115].

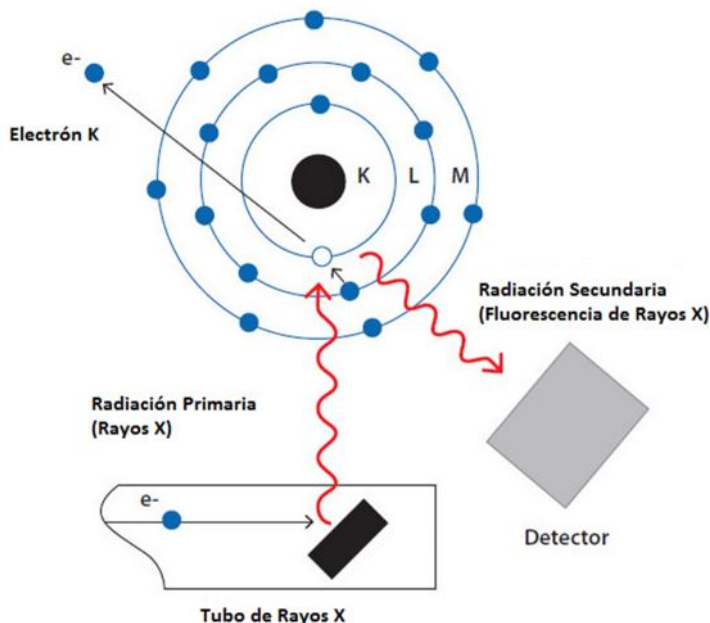


Figura 2.24 Principio de la fluorescencia de rayos X [116]

2.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB, SEM):

En el SEM (del inglés: "Scanning electron microscope") un haz de electrones, la sonda del microscopio, es generado por un filamento incandescente. Los electrones emitidos son acelerados a una rejilla cercana polarizada positivamente. Este haz de electrones, en un viaje a través del vacío, tiende a separarse debido a las fuerzas de repulsión electrostáticas que actúan entre ellos. Un campo eléctrico, generado por unas placas, se encarga de focalizar el haz y condensarlo. Por último, en su camino hacia la muestra, el haz es deflectado hacia un punto mediante bobinas electromagnéticas, de manera que estas permiten realizar un barrido en la zona que queremos estudiar [111]. El proceso explicado se encuentra ilustrado en la figura 2.25.

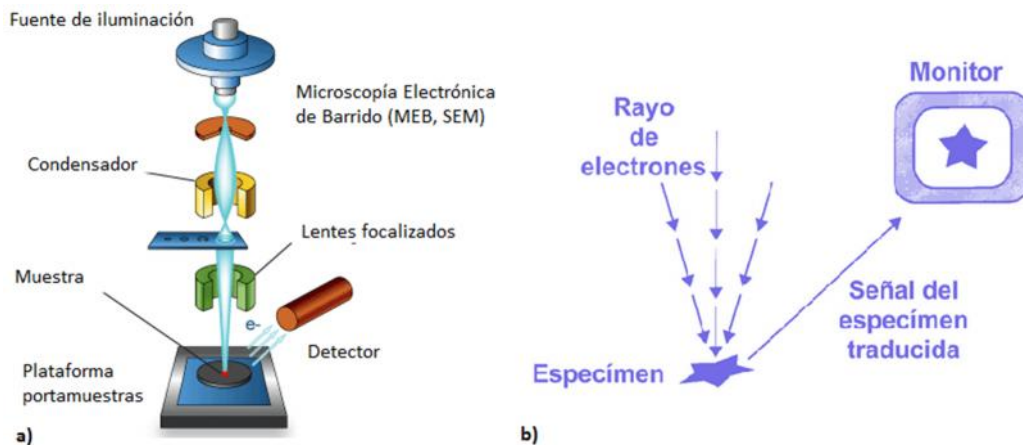


Figura 2.25 a) Esquema de funcionamiento del microscopio electrónico de barrido, b) Señal convertida [119][120].

Las técnicas de microscopía electrónica permiten la observación de la microestructura y morfología superficial de los recubrimientos debido a que se puede usar con una resolución que supera a la correspondiente a una observación óptica. Paralelamente, la microscopía es un área de trabajo multidisciplinar y de procesos [116], por lo tanto, es aplicable a muchos tipos de muestras [21]. Para esta investigación se usó la microscopía electrónica de barrido (MEB). Con esta técnica es posible identificar los elementos presentes desde el Sodio hasta el Uranio [21][117].

La emisión de electrones del cátodo se da por efecto Schottky o emisión de campo y emisión termiónica. Los electrones son acelerados a una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo que puede ser tan bajo como 0.1 keV o tan alto como 50 keV. El haz de electrones consiste en un flujo colimado de electrones libres de velocidad elevada [67]. La principal ventaja de este microscopio es la facilidad de manejo combinada con una buena resolución. Por otra parte las imágenes obtenidas presentan una amplia profundidad de campo, que posibilita el estudio de muestras rugosas y microcristales. Dentro de los inconvenientes cabe destacar el que la muestra en estudio debe de ser metálica. Si la muestra no es capaz de liberarse de los electrones que le llegan derivándolos a tierra, estos se acumulan localmente, creando una carga negativa importante localizada en la superficie. Esta acumulación de carga origina una distorsión en la imagen como consecuencia de la deflexión del haz de electrones al incidir cerca de esas zonas de la muestra. La manera de solucionar este problema es recubriendo la muestra a estudiar con una pequeña capa de oro, que proporciona la conductividad eléctrica necesaria para dirigir los electrones a tierra [111]. En la **Tabla *** se presenta un resumen de algunas de las ventajas y limitaciones de la microscopía electrónica de barrido.

Tabla 8 Algunas ventajas y limitaciones de la microscopía electrónica de barrido [111].

Ventajas	Limitaciones
Facilidad de manejo	Las muestras deben ser metálicas o recubiertas de oro
Elevada resolución	Posible daño en el material
Amplia profundidad de campo	Necesita vacío, por lo tanto no se pueden analizar organismos vivos.
Posibilidad de combinar microscopía con análisis espectroscópico	Alto costo

2.5.4 Microscopía Confocal:

En los años 40 se inventó el microscopio confocal, el cual fue un avance tecnológico importante para el estudio de muestras microscópicas. Estos microscopios multiplican la resolución por un factor de 1.5 respecto a su operación habitual y están basados en sistemas de discriminación de señales fuera de foco, de ahí su nombre. Los microscopios confocales incorporan un sistema de barrido por el que el objeto es iluminado en un solo punto, y solo ese punto es medido mediante un sistema de diafragmas llamado "pin hole", que es un colimador de orificio de limitante [21] [116]. La focalización del láser que realiza el barrido, y por tanto la resolución es de 0,25 μm y la profundidad de campo en estos sistemas es aproximadamente de 0,5 μm . Este tipo de microscopios tiene un gran interés principalmente en el estudio de muestras biológicas [116].

La generación de imágenes en dos dimensiones (2D) en la microscopía confocal comprende tres pasos principales:

- 1- Barrido línea a línea de la muestra con un haz láser deflecionado en el plano X y Y por medio de dos escáneres galvanométricos.
- 2- Detección pixel a pixel de la fluorescencia emitida por la muestra por medio de un tubo fotomultiplicador (PMT).
- 3- La digitalización de la información contenida en la señal eléctrica provista por el PMT.

En la figura 2.26, se presenta el recorrido del rayo láser, el cual es focalizado en el microscopio por medio de un lente y este incide sobre la muestra donde hay una excitación de fluorescencia. El colimador o "pin hole" es el encargado de permitir el paso de la luz reflejada en un solo plano, por lo cual es posible hacer análisis punto a punto, ya que el punto iluminado y el punto observado se encuentran enfocados al estar en un plano conjugado [21].

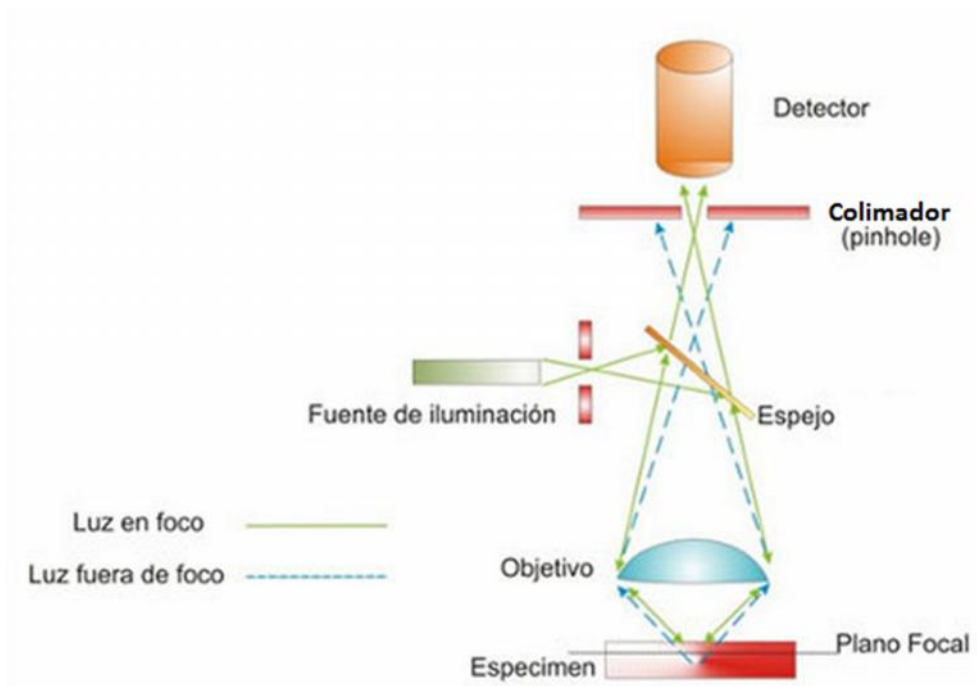


Figura 2.26 Esquema del funcionamiento del microscopio láser confocal [121].

Finalmente la imagen obtenida es afectada por la óptica, la apertura confocal, la digitalización de la información de la muestra (tamaño de pixel) y el ruido. Con el fin de minimizar la influencia de este último se emplean dispositivos optoelectrónicos y electrónicos [21].

En esta investigación, se realizaron análisis de la superficie de los recubrimientos para hallar el valor de rugosidad R_a y R_{sa} con un microscopio laser confocal marca Zeiss referencia LSM 700, con poder de resolución máximo de 250 nm, proporcionando imágenes con un aumento máximo de 100X.

3. Metodología

3.1 Preparación de la superficie

La adherencia del recubrimiento al sustrato, depende en buena parte de la preparación de la superficie antes de la aplicación del recubrimiento, ya que las uniones que se producen generalmente en el proceso son de carácter mecánico [3]. Para garantizar una buena adherencia de las capas producidas se deben preparar los sustratos correctamente mediante una buena limpieza superficial y adecuando la rugosidad superficial.

Es importante retirar cualquier tipo de impurezas (como humedad, capas de grasa o aceite, óxidos o pinturas) que impidan una buena adhesión de la capa al sustrato; esto lo realizamos previamente con una limpieza superficial que una vez sea ejecutada, se debe evitar el contacto superficial hasta cuando se adecúe la rugosidad superficial y la deposición del recubrimiento. Por tanto, debe llevarse a cabo sólo cuando se encuentre próximo el proceso de proyección.

Primero se fabricaron las probetas con área circular de 20 mm de diámetro y 5 mm de espesor. Y las probetas rectangular de 1" X 3" área transversal por ½" espesor. Luego se calentaron en un horno de tratamiento térmico a 200°C para eliminar posibles impurezas que impidieran que procesos posteriores tuvieran éxito.

En esta primera etapa de preparación, se realizó a limpieza mecánica de la superficie, la cual se basó en el principio de abrasión; donde se utilizaron partículas de mayor dureza

para retirar las capas de impureza que pudieran quedar. La técnica a utilizar es la limpieza con chorro abrasivo (granallado con alúmina), donde las partículas de un material más duro son impactadas sobre la superficie a través de aire comprimido. Las propiedades de los abrasivos son las siguientes:

- Arena fina: Arena comercial, tamaño de partícula de 200 μm aproximadamente, dirigida sobre la superficie de los sustratos con presión de 100 psi por un lapso de 15 segundos
- Granalla gruesa: Alúmina con tamaño de partícula de 500 μm , dirigida sobre la superficie de los sustratos por un lapso de 15 segundos.

Dependiendo el tipo de material, la aleación y otros factores; el tamaño de estas partículas de abrasivo debe seleccionarse cuidadosamente, con el fin de evitar distorsiones o cambios dimensionales en el sustrato.

El precalentamiento, es un tratamiento alternativo previo a la deposición del recubrimiento. El incremento de temperatura en el sustrato, se recomienda para eliminar la humedad superficial y mejorar la adherencia del recubrimiento. Las temperaturas aconsejadas para el precalentamiento varían entre los 100°C y 200°C y deben hacerse de manera homogénea sobre toda la superficie, para evitar tensiones residuales localizadas que causen fractura del recubrimiento y su desprendimiento. [3]

Sin embargo se decidió trabajar con temperaturas superiores para evaluar el efecto de los cambios de temperatura al momento de la deposición.

Luego de tener listas las probetas se utilizará un Soplete *Superjet Eutalloy*, que es un sistema de proyección térmica que usa oxígeno y acetileno para la producción de la llama que funde el material del aporte. El oxígeno también es el gas de arrastre de las partículas hacia el sustrato. Cuenta con un juego de lanzas que son usadas para determinadas aplicaciones, como bordes o superficies planas. El equipo utilizado se puede apreciar en la figura 3.1.

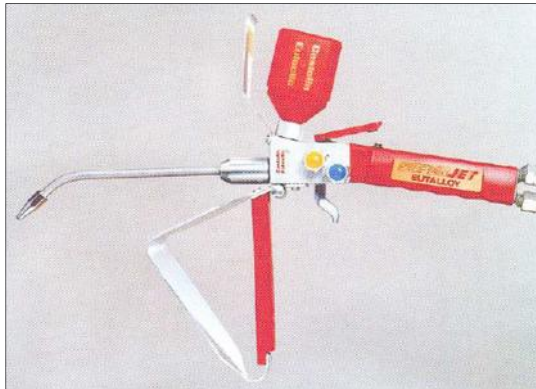


Figura 3.1 Soplete superjet Eutalloy [54]

Los polvos base a utilizar son Nitec 10224 [8] con las propiedades que se observan en la tabla 9.

Tabla 9 Propiedades del polvo Nitec 10224

Composición química	Ni+ 4%Fe, B, Si
Dureza (HV30)	200-240
Temperatura de fusión °C	1050 -1280
Densidad (g/cm3)	8.1
Temperatura de estabilización °C	Hasta 600
Propiedad de fricción metal-metal	Excelente
Resistencia a la corrosión	Muy buena
Maquinabilidad	Excelente, con herramientas de corte en buen estado
Materiales base recomendados	Aceros, fundiciones, aleaciones de níquel
Gases	Oxígeno y acetileno
Antorcha recomendada	Superjet Eutalloy

Y Metaceram 23075 [9] con las propiedades que se aprecian en la tabla 10:

Tabla 10 Propiedades del polvo Metaceram 23075

Composición química	44Ni + 40WC/Co + 9.3Cr + 1.9B 2.1Fe + 2.3Si + 0.4C
Dureza (HV)	690
Resistencia al desgaste por erosión abrasión	Excelente
Resistencia a la corrosión	Muy buena
Maquinabilidad	Buena, con herramientas de corte en buen estado
Materiales base recomendados	Aceros, aleaciones de níquel y fundiciones de hierro gris
Gases	Oxígeno y acetileno
Antorcha recomendada	Superjet Eutalloy

3.1.1 Nitec

Aleación de níquel y composición química Ni+ 4%Fe, B, Si con adiciones de hierro, boro y silicio ideal para la protección por capas, juntas o enchapado así como aplicaciones en metales tales como aceros, fundiciones de hierro y aleaciones de níquel.

El depósito es fusible y fácilmente mecanizable con herramientas estándar, debido a su bajo coeficiente de fricción y resistencia al desgaste, ideal para protección en piezas metálicas, en contacto con otros metales, metal-metal. [10]

3.1.2 Metaceram 23075

Polvo fusible con base de Níquel y composición 44Ni 40WC/Co 9.3Cr 1.9B 2.1Fe 2.3Si 0.4C, con dureza 58 HRC y temperatura de operación de 650°C. El carburo de tungsteno le proporciona mejoras su comportamiento frente al desgaste erosivo y aumenta su resistencia [10]

El desarrollo de los objetivos específicos se propone de la siguiente manera:

3.2 Producción de recubrimientos

Producción de los recubrimientos comerciales Nitec 10224 y Metaceram 23075, sobre sustratos de fundición gris, haciendo uso de los parámetros de proceso recomendados comercialmente.

Para depositar los recubrimientos se usará de la Pistola Superjet Eutalloy, un soplete de proyección que se adapta fácilmente para realizar recubrimientos superficiales, reparar superficies metálicas planas, bordes de precisión ó piezas de rotación. El equipo utiliza una gama especial de lanzas con inyector para realizar depósitos con distintas particularidades y puede proyectar una amplia variedad de recubrimientos de protección que se funden y se unen metalúrgicamente al sustrato. Utiliza oxígeno y acetileno como gases de proceso. El proceso estará a cargo de un solo operario, con el fin de minimizar el error experimental por variaciones durante la aplicación. [10]

Los recubrimientos se depositarán con las siguientes condiciones de depósito

- Lanza: B3
- Presión de oxígeno: 37 Psi
- Presión de acetileno: 9 Psi
- Distancia de proyección: 100mm Aprox.

Los recubrimientos se prepararon de tal forma que para garantizar un óptimo anclaje mecánico, fue necesario realizar un granallado sobre la superficie como se aprecia en la figura 3.2, antes de realizar los depósitos de proyección térmica con llama.

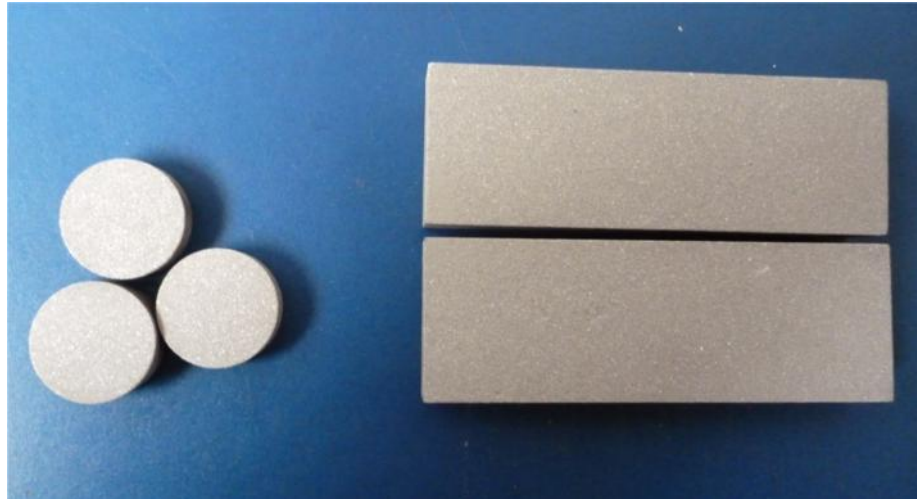


Figura 3.2 Probetas luego del granallado

3.3 Diseño de Experimentos

El diseño experimental es un diseño factorial con dos factores, recubrimiento y temperatura.

Se usará fundición gris para todos los sustratos (30 cilíndricos y 30 rectangulares).

- Los niveles del sustrato están dados por: Temperaturas del sustrato antes de la aplicación de 300, 400 y 500°C

- Los niveles de recubrimiento están dados por: Nitec 10224 y Metaceram 23075 según la tabla 11.

Tabla 11 Niveles de recubrimientos

TEMPERATURA (A)	RECUBRIMIENTO (B)	PROBETAS CIRCULARES	PROBETAS RECTANGULARES
300	Nitec 10224 (N3)	5	5
	Metaceram 23075 (M3)	5	5
400	Nitec 10224 (N4)	5	5
	Metaceram 23075 (M4)	5	5
500	Nitec 10224 (N5)	5	5
	Metaceram 23075 (M5)	5	5

Para controlar la temperatura se usó un Termometro digital con termocupla tipo K con rangos de -50°C hasta 1200°C.

Al finalizar los recubrimientos se realizarán las pruebas de adherencia y desgaste mediante las técnicas de pin on disk, desgaste abrasivo y scratch test respectivamente.

Para la prueba de pin on disk se realiza la limpieza de los especímenes. Se pesan y se miden las probetas. Se deberá insertar el disco en el dispositivo de sujeción, de tal manera que el disco se encuentre perpendicular al eje de rotación. Insertar la probeta de pin en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quede perpendicular al disco, y así se tenga el mejor contacto.

Se aplica la carga apropiada al pin, de acuerdo a las condiciones de desgaste que se quieren medir. Se prende el motor y se ajusta la velocidad (rpm) hasta el valor deseado. Se inicia el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga. La prueba se

detendrá cuando se hayan completado el número de revoluciones programadas o el tiempo establecido. La prueba no deberá ser reiniciada o interrumpida.

Extraiga las probetas y límpielas de cualquier partícula y esquirlas presentes. Observar la presencia de protuberancias, desplazamientos de metal, decoloración, microfracturas o anomalías superficiales. Se deberá medir nuevamente las probetas en cuanto a dimensiones y peso. Esta prueba se debe repetir varias veces con el propósito de tener suficientes datos que estadísticamente produzcan resultados significativos.

Para la prueba de desgaste se utilizará una máquina de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65-04 con condiciones de carga de 130 N, aplicada durante 10 minutos, con flujo de arena de 300-400 g/min y la rueda de caucho girando a 200 rpm. La máquina y sus partes se puede apreciar en la figura 3.3.

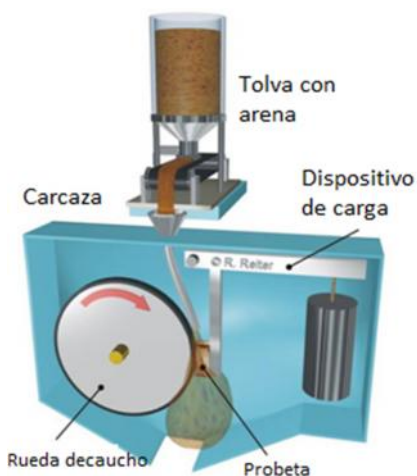


Figura 3.3 Máquina de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65-04

La caracterización de los recubrimientos se realizará por medio de técnicas de microscopía electrónica, difracción de rayos X y FRX, utilizando los equipos que se mencionan a continuación:

- Microscopio Electrónico de Barrido FEI QUANTA 200 que consta de un cañón de electrones con su óptica, cámara de muestras, circuito de vacío, electrónica de detección y registro de imagen. Cuenta con un programa con el cual se toman las micrografías “xT microscope control” versión 2.01 y otro programa con el cual se realizan análisis EDX llamado “Control Software” versión 1.00. (Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá)
- El equipo utilizado fue un Espectrómetro de Fluorescencia marca Philips modelo MagiXPro. PW-2440 equipo con un tubo de rodio, este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0,02%) en la detección de elementos metálicos pesados.
- Equipo para difracción de rayos X, Panalytical X’Pert PRO MPD que permite obtener información sobre la fase y estructura cristalinas de todo tipo de materiales en polvo, película delgada y en bloque. Adicionalmente, a través de procesamiento de los datos de los difractogramas se puede obtener información de parámetros cristalográficos y de orientación preferencial de los planos de reflexión. (Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá)
- Máquina Tribómetro CETR UMT-2M-110 y la técnica de “pin on disk”, utilizando bolas de acero endurecido de 6.3 mm de diámetro. La prueba fue realizada a una temperatura de 20 °C aplicando una carga de 4N con un tiempo de 30 minutos y una velocidad de 100 mm/s. El tamaño de la huella se midió con microscopio óptico.
- El ensayo de dureza que se adoptara es el ensayo de microdureza Knoop bajo la norma ASTM E384 [99]. Las mediciones de microdureza se realizaron con un equipo Leco M-400-G2 el cual consta de un indentador de microdureza knoop y un tiempo de 20 segundos por medición. Estas mediciones se realizaron sobre la parte transversal del recubrimiento y se trabajaron cargas de 300 g.
- El ensayo de adhesión y/o cohesión se mide utilizando la prueba de rayado según norma ASTM C633-79 [100] Se utilizó un equipo de rayado CSM Revetest Xpress

Scratch Tester con un indentador Rockwell C de diamante. Según boletín del CSM Instrument. [36]

- Las microscopías confocales y el análisis morfológico de las huellas dejadas por las pruebas de Pin on Disk y Abrasión se realizó con un microscopio laser confocal marca Zeiss referencia LSM 700 con un poder de resolución máximo de 250 nm, proporcionando imágenes con un aumento de 10X, 20X y 50 X.

4. Resultados y Discusión

4.1 Microestructura y composición química de los recubrimientos

4.1.1 Nitec 10224

4.1.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX):

En la tabla 12 se observa y se confirma la captura de información el rayo emitido sobre la capa del sustrato y del recubrimiento en la tabla 13, donde esta última muestra la composición química con un alto porcentaje de Ni seguido del Si, principales componentes del polvo de aporte Nitec [15].

Tabla 12 Resultados de análisis químico del sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Fe	C	Si	Mn	Cr	S	Cu	P	Ni	Sn	Mo
%	92,71	3,49	2,66	0,38	0,22	0,19	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03

Tabla 13 Resultados de análisis químico del recubrimiento de Nitec depositado sobre el sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Ni	Si	Fe	Na	Al	Cl	S	K	Cr
%	95,88	1,99	0,98	0,58	0,42	0,09	0,07	0,06	0,04

El análisis de la tabla 13 también reveló porcentajes comparablemente pequeños con los del Fe y el Si, los cuales corresponden a los elementos que conforman el material del sustrato de fundición principalmente Fe. También se confirma que los rayos X incidentes reflejaron la información de la composición química de los recubrimientos, al mostrar un alto porcentaje de los elementos Ni y Si, principales componentes del polvo de aporte Nitec. El análisis también reveló porcentajes comparablemente pequeños con los del Ni y el Si, los cuales corresponden a los elementos que conforman el material de los sustratos, específicamente del Fe ya que los sustratos son de fundición [3].

4.1.1.2 Difracción de rayos X (DRX)

La figura 4.1 presenta los patrones de difracción de rayos X en los recubrimientos de Nitec variando la temperatura del sustrato. No se aprecian grandes diferencias entre los difractogramas, lo que indica que la temperatura del sustrato al momento de la proyección térmica no afecta la composición del material.

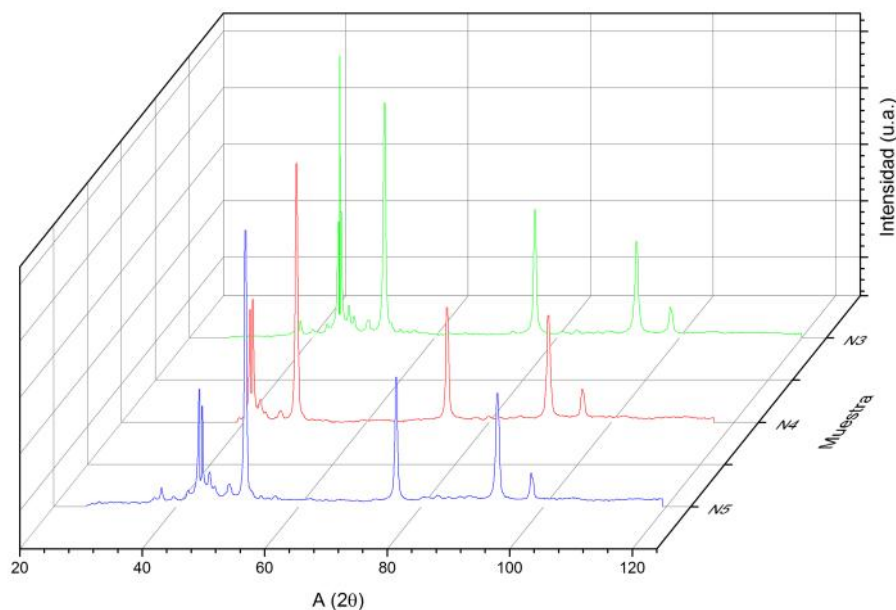


Figura 4.1 Difractogramas de Nitec a diferentes temperaturas.

Se puede observar una orientación mixta con los picos principales característicos de Ni donde localizan en las posiciones y direcciones $44, 5253^\circ [1\ 1\ 1]$, $51,8457^\circ [2\ 0\ 0]$ y $76,4208^\circ [2\ 2\ 0]$ que corresponden a la fase cristalina BCC de Níquel metálico con parámetros de red 3.5238 \AA . Estos son datos que concuerdan de acuerdo a los trabajos realizados en [18] y por Siamak Pilban Jahromi y colaboradores [19] y Kim Saw y colabores [20]. La estructura atómica del elemento es BCC, con parámetro de red a 3.5238 \AA para el Níquel [18].

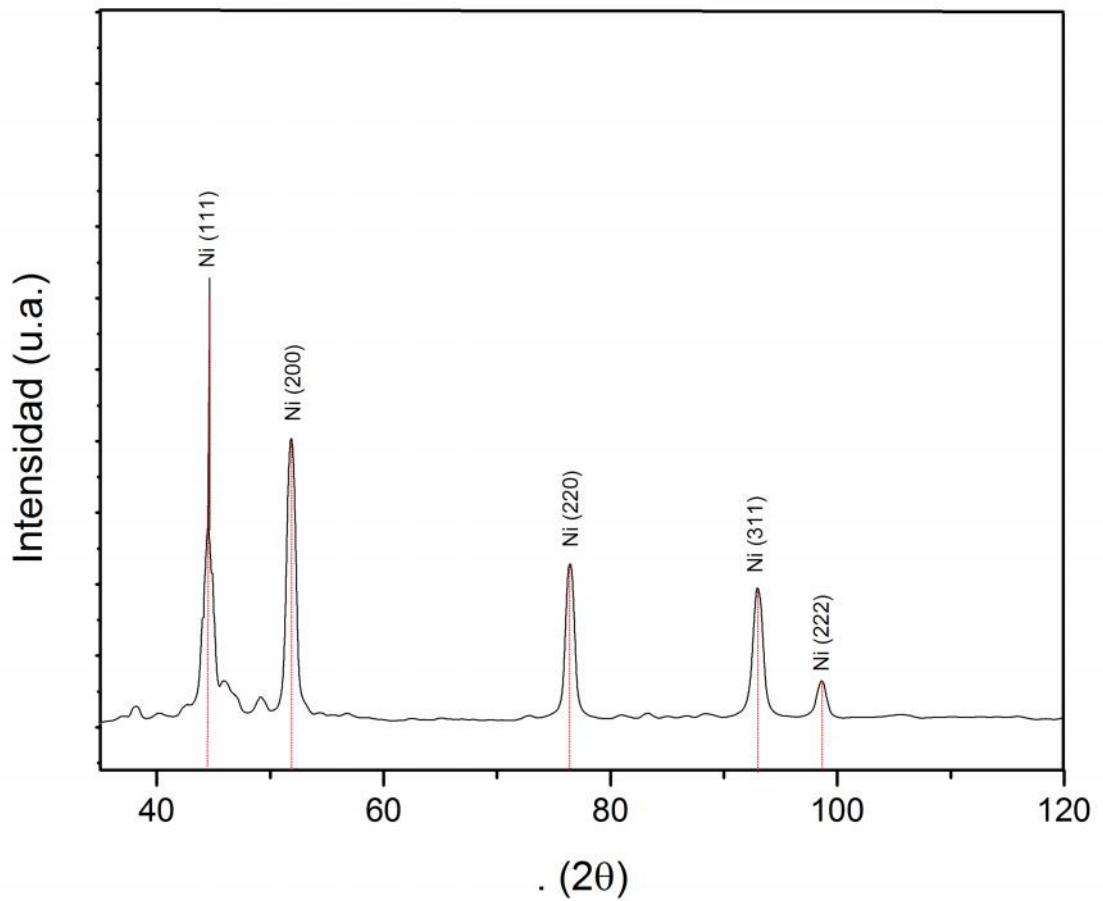


Figura 4.2 Difractogramas de Nitec posiciones y direcciones de fase a diferentes temperaturas.

4.1.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido SEM:

En la figura 4.3 se observa una microscopía SEM con una magnificación de 1000x, donde es apreciable la morfología del polvo de aporte a base de Niquel (Nitec). Tiene una estructura alargada y esferoidal con un característico gris oscuro brillante; estos datos coinciden con los tomados por Martínez G. y colaboradores. [3]

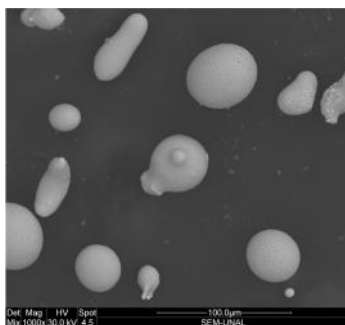


Figura 4.3 Morfología del polvo de aporte Nitec a 1000X

En la figura 4.4 se presenta la microestructura del recubrimiento Nitec depositado sobre el sustrato de fundición, las cuales fueron tomadas con la técnica de microscopía SEM. En ellas es posible observar los estados de las partículas del recubrimiento fundido y sin fundir.

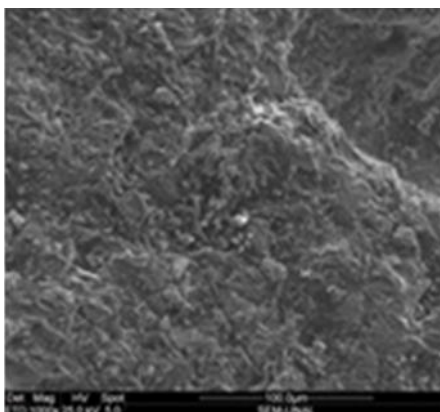


Figura 4.4 Sustrato de fundición con recubrimiento de Nitec a 500X

La figura 4.3 presenta la morfología de la superficie de la capa de Nitec depositada sobre fundición ampliada a 500X (N5), donde se observan las partículas fundidas en forma de splats alargados, superpuestas y acumuladas en una estructura laminar. Las secciones de tonalidad más oscura, corresponden a superficies oxidadas y al aumento de temperatura final con llama para la fusión óptima de la capa [3]. La morfología de las capas de Nitec se observa compacta y con baja porosidad; además no muestra efectos de la preparación del sustrato mediante el granallado previo que se le hizo.

En la figura 4.5 se observa un corte transversal del recubrimiento Nitec depositado sobre el sustrato de fundición. En ellas se observa que la capa de recubrimiento de Ni, se adhiere a la superficie del sustrato por acción de fuerzas mecánicas y metalúrgicas. Se observa claramente la estructura laminar de las partículas del polvo Nitec deformadas y superpuestas unas sobre otras, así como la presencia de defectos propios de la técnica como los poros y las cavidades. [3] En (a) el recubrimiento de Nitec con una fusión homogénea y estructura granular sobre (c) el sustrato de fundición gris, y la zona de difusión (c).

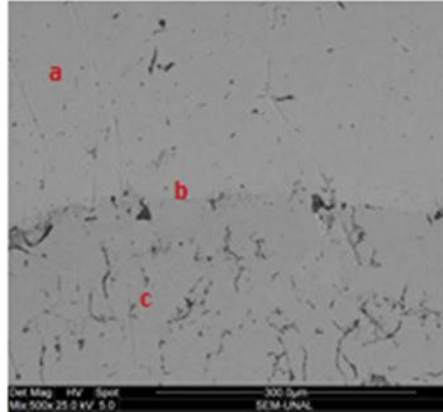


Figura 4.5 Sección transversal del sustrato de fundición con recubrimiento de Nitec a 500X

Se observa que la imagen muestra con total claridad la línea de interfaz que separa el sustrato del recubrimiento. La fusión del polvo de aporte de Ni, durante la segunda etapa del proceso, generó una difusión de buena parte del recubrimiento en el sustrato, por ser elementos con punto de fusión y coeficiente térmico afines. [1][3] Se distingue la estructura del grafito propia de la fundición y algunas porosidades típicas de ésta.

4.1.1.4 Microscopía Confocal

Con el fin de determinar el mecanismo de desgaste presente en la pruebas de desgaste abrasivo, se muestra en la figura 4.6, las micrografías confocales de los recubrimientos de N3(a), N4(b) y N5(c). Se aprecia que en los tres gráficos existe una región con una línea roja que cruza de un lado al otro, esto con el fin de obtener una rugosidad media de la superficie como se observa en la figura 4.7.

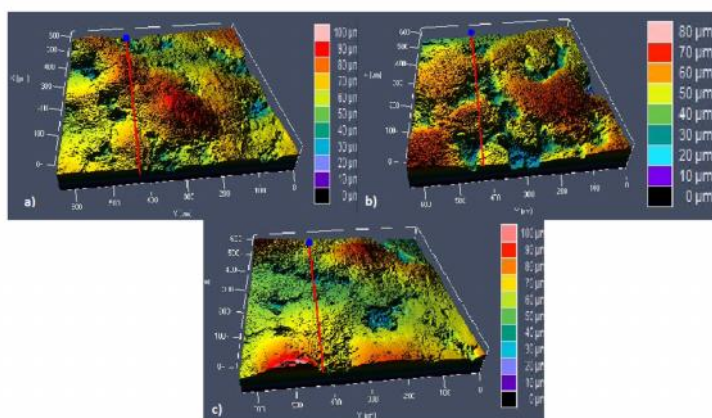


Figura 4.6 Microscopía Confocal de la superficie Nitec a) N3, b) N4 y c) N5.

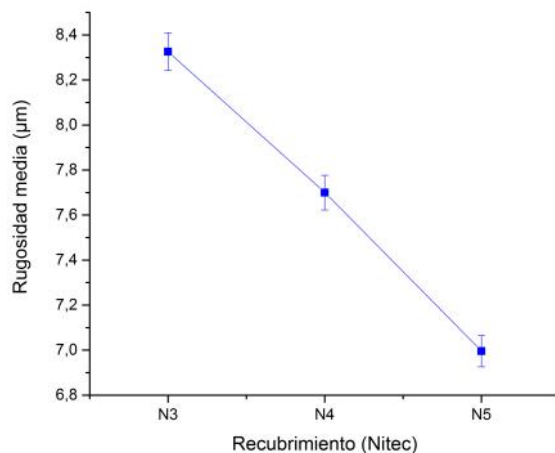


Figura 4.7 Rugosidad media de la superficie Nitec .

En la figura 4.7 se aprecia un decrecimiento de la rugosidad superficial del recubrimiento Nitec con respecto a la temperatura del sustrato antes de la deposición por proyección térmica., donde a mayor temperatura del sustrato, menor es la rugosidad del recubrimiento y además es lineal y proporcional. Esto se debe al hecho de que a mayor temperatura del sustrato, es mayor el anclaje mecánico, ya que las partículas se funden rápidamente y la superficie queda más homogénea. Hay que evidenciar también que al aumentar la temperatura, también generamos aumento de burbujas de aire lo que se traduce en porosidades superficiales e internas en algunos sectores del recubrimiento [80] [101].

4.1.2 Metaceram 23075

4.1.2.1 Fluorescencia de rayos X (FRX):

En la tabla 14 se aprecia la información del rayo emitido sobre la capa del recubrimiento, donde se muestra un alto porcentaje de Ni y W con más de 36% respectivamente y un porcentaje de Cr apreciable de más de 12%; principales componentes del polvo de aporte Metaceram [9].

Tabla 14 Resultados de análisis químico del recubrimiento de Metaceram depositado sobre el sustrato de fundición mediante Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Ni	W	Cr	Fe	Co	Si	Al	F	Na
%	38,793	37,792	13,398	3,451	3,348	1,773	0,951	0,432	0,062

Los resultados de la tabla 14, confirman que los rayos X incidentes reflejaron la información de la composición química de los recubrimientos, al mostrar un alto porcentaje de los elementos Ni y W, principales componentes del polvo de aporte Metaceram [9]. El análisis también reveló porcentajes relativamente pequeños de Fe, Co

y Si, los cuales corresponden a los elementos que conforman el material del sustrato, específicamente del Fe ya que los sustratos son de fundición [3].

4.1.2.2 Difracción de rayos X (DRX):

La figura 4.8 presenta los patrones de difracción de rayos X en los recubrimientos de Metaceram variando la temperatura del sustrato. A pesar de la complejidad de la difracción por la diferencia estrecha de materiales en la aleación de Metaceram como se observó en la prueba FRX, no se aprecian cambios significativos con respecto a la temperatura del sustrato antes de la proyección térmica. Esto quiere decir que la composición química permanece intacta.

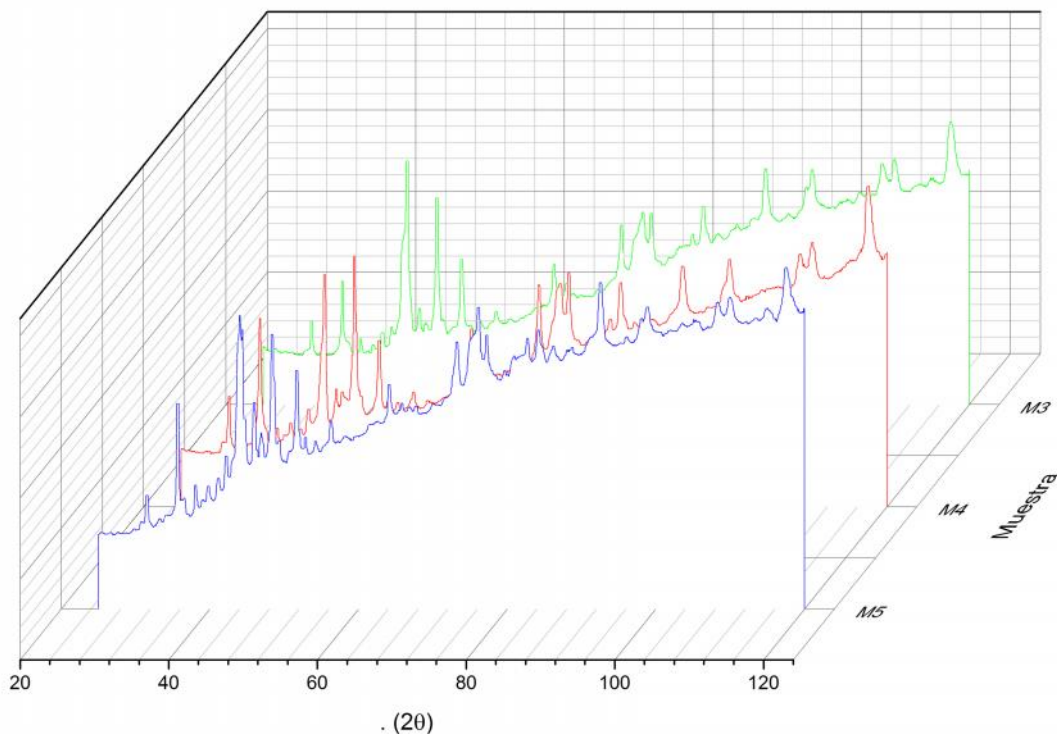


Figura 4.8 Patrones de difracción de Rayos X en Metaceram.

En la figura 4.9 se observan los picos de difracción del Metaceram con una orientación mixta con los picos principales característicos de Ni donde localizan en las posiciones y direcciones 44, 5253° [1 1 1], 51,8457° [2 0 0] y 76,4208° [2 2 0] que corresponden a la fase cristalina BCC de Níquel metálico con parámetros de red 3.5238 Å. Estos son datos que concuerdan de acuerdo a los trabajos realizados en [18] y por Siamak Pilban Jahromi y colaboradores [19] y Kim Saw y colabores [20]. La estructura atómica del elemento es BCC, con parámetro de red a 3.5238 Å para el Níquel [18]. Se aprecia también los picos característicos del Tungsteno los cuales se ubican en las siguientes posiciones con sus respectivas direcciones: 31.512° y [0 0 1], 35.642° y [1 0 0], 48.297° y [1 0 1], 64.024° y [1 1 0], 65.758° y [0 0 2], 73.106° y [1 1 1], 75.480° y [2 2 0], 84.070° y [2 0 1], de acuerdo a la carta 00-051-0939. [74]. Su estructura atómica es hexagonal, y los parámetros de su red están definidos como $a=b=0.291 \pm 0.02$ nm y $c=0.280 \pm 0.02$ nm. [26][19] Los resultados coinciden con los obtenidos otros estudios; como el presentado por Sebeya Thabo y colaboradores [26] donde realizaron pruebas de corrosión y XRD a recubrimientos a base de WC-Co, igualmente el estudio de R. Hernández y colaboradores,[76] presenta resultados comparables en el análisis micro estructural donde se realizaron estudios sobre recubrimientos de composición similar a la del Metaceram (Ni-WC-Co), pero depositados por la técnica de deposición electroforética sobre sustratos de acero inoxidable. Y también son comparables los estudios de Martínez G. y colaboradores [3] quienes realizaron difracciones de rayos X sobre recubrimientos del mismo compuesto usado en éste trabajo (Metaceram 23075).

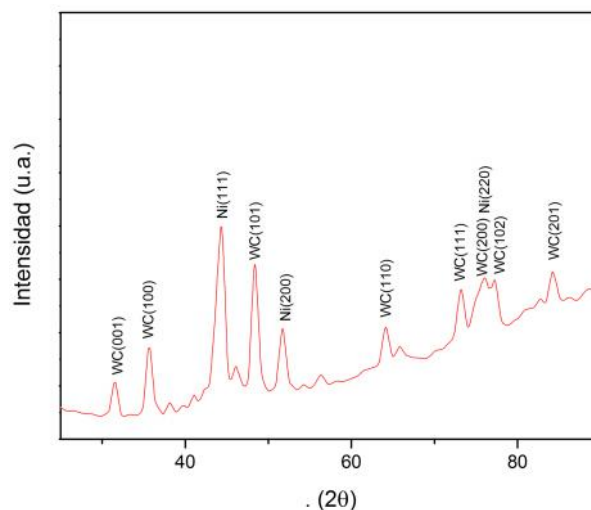


Figura 4.9 Picos de difracción de los patrones de difracción de Rayos X en Metaceram

4.1.2.3 Microscopía Electrónica de Barrido SEM:

Por medio de SEM se determinó la morfología del material de aporte y del recubrimiento. La figura 4.10 presenta el polvo de aporte Metaceram 23075, se aprecia la calidad del compuesto, identificando las partículas de tonalidad gris oscura como Níquel, y las de tonalidad gris clara como WC/Co, esto concuerda con el estudio de las propiedades de recubrimientos de WC/Co con capa liga de Ni realizado por Tong Yul y colaboradores. [79]

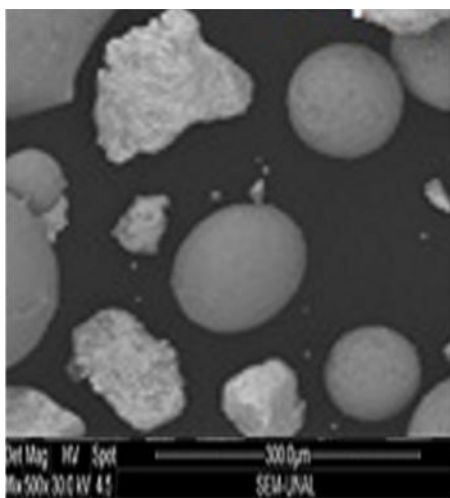


Figura 4.10 Morfología del polvo de aporte Metaceram a 300X.

En la figura 4.11 se observa una microscopía SEM con una magnificación de 150x, donde se aprecia la morfología del polvo de aporte a base de Metaceram y sus constituyentes Níquel y Carburo de Tungsteno.

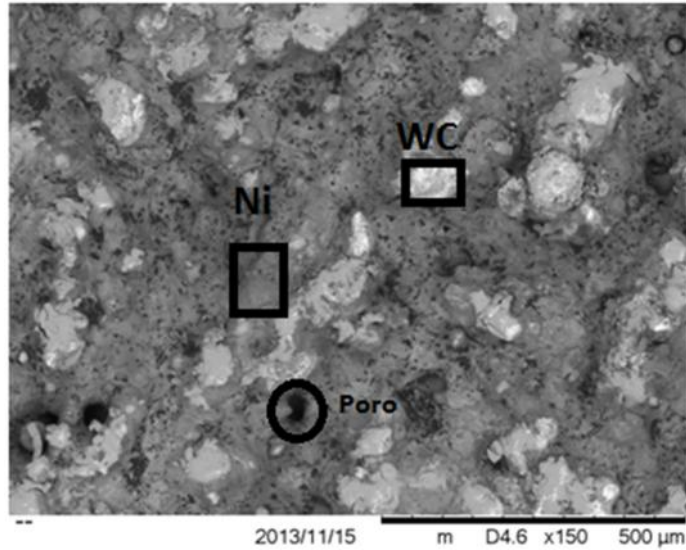


Figura 4.11 Morfología del recubrimiento de Metaceram sobre el sustrato de fundición gris a 150X.

En las figura 4.12 se observan las partículas a) semifundidas de Ni, b) sin fundir de Ni y c) sin fundir de WC. Además la mayor parte de la morfología del recubrimiento se encuentra completamente fundida y solo en algunas partes se observa semifundida o sin fundir; lo cual será apreciado a continuación.

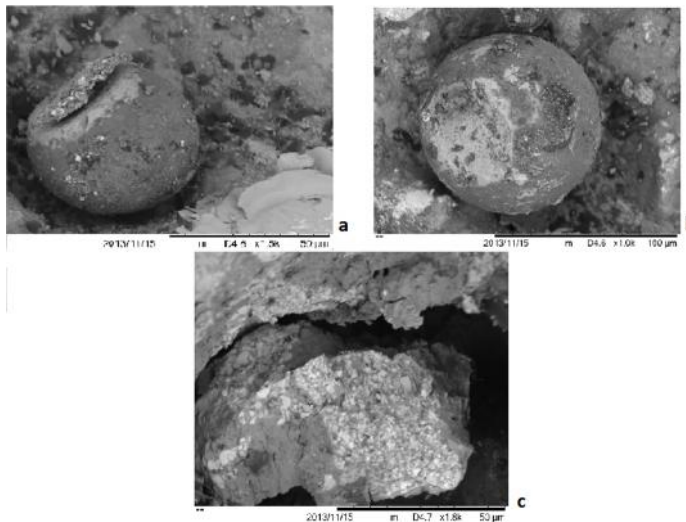


Figura 4.12 Recubrimiento de Metaceram con partículas a) semifundidas de Ni 1500x, b) sin fundir de Ni 1000x y c) sin fundir de WC 1800x

En la figura 4.13 se presenta la sección transversal del recubrimiento de Metaceram depositado donde la capa de Ni + WC se adhiere a la superficie del sustrato por acción de fuerzas metalúrgicas. Analizando la adherencia del recubrimiento observamos la fusión de dos etapas de la proyección térmica del recubrimiento en el sustrato; además es favorecida también por la preparación de la superficie gracias a los estudios realizados por G. Martinez y colaboradores [3]. Se observan zonas de punto de anclaje y difusión donde es posible identificar la interfaz (b) entre el sustrato (c) y el recubrimiento (a); además es apreciable que la línea de interfaz no presenta mayores variaciones de perfil.

No obstante la capa permanece homogénea en su totalidad y es fácilmente observable que se encuentra bien adherida a la superficie y que hay una zona de difusión del recubrimiento en el sustrato debido a la etapa de fusión de la capa luego de ser deposita. La figura 4.13 muestra que la interfaz se confunde entre la superficie de la fundición y el recubrimiento gracias a una alta fusión entre los dos materiales. Esto se debe principalmente al proceso de granallado que se realizó antes de depositar el recubrimiento. Esto coincide con el trabajo realizado por G. Martinez y colaboradores [3], Dimaté L. y colaboradores [5] e Hincapie W. [21].

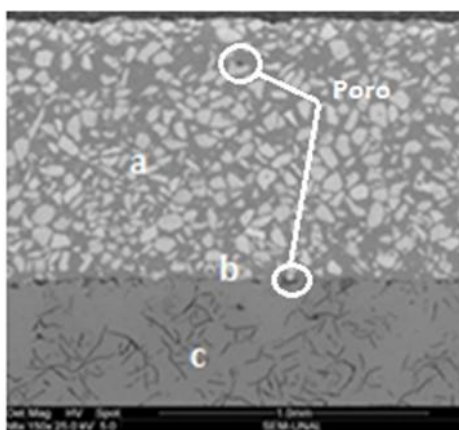


Figura 4.13 Sección transversal del recubrimiento de Metaceram 23075, a) recubrimiento, b) zona de interfaz y c) sustrato fundición.

4.1.2.4 Microscopía Confocal:

Con el fin de determinar el mecanismo de desgaste presente en la pruebas de desgaste abrasivo, se muestra en la figura 4.14 las micrografías confocales de los recubrimientos de Metaceram para las diferentes temperaturas de deposición M3(a), M4(b) y M5(c). Se aprecia que en los tres gráficos existe una región con una línea roja que cruza de un lado al otro, esto con el fin de obtener una rugosidad media de la superficie como se observa en la figura 4.15.

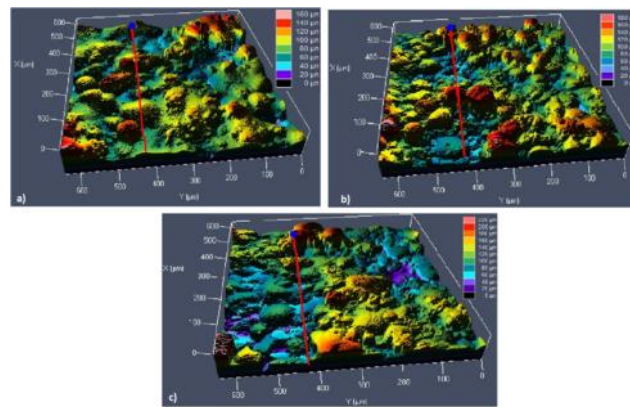


Figura 4.14 Microscopía Confocal de la superficie Metaceram) M3, b) M4 y c) M5

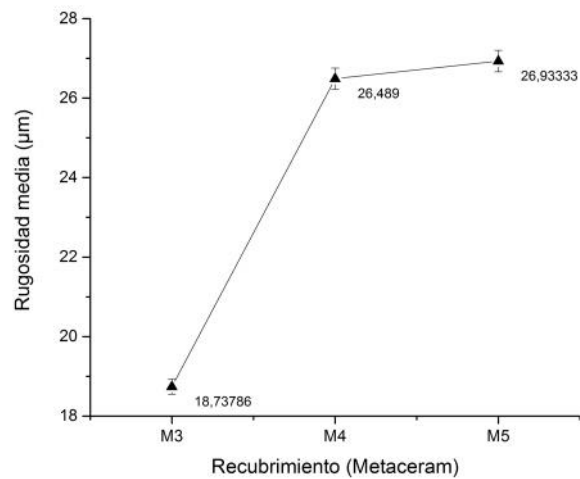


Figura 4.15 Rugosidad media de la superficie Metaceram.

En la figura 4.15 se aprecia un crecimiento de la rugosidad superficial del recubrimiento Metaceram con respecto a la temperatura del sustrato antes de la deposición por proyección térmica, donde a mayor temperatura del sustrato, mayor es la rugosidad del recubrimiento; sin embargo no sigue un parámetro lineal. Se podría pensar que el anclaje mecánico es mejor cuando el sustrato está a una temperatura más alta; pero a diferencia de los recubrimientos de Nitec, los recubrimientos de Metaceram tienen un alto porcentaje de Tungsteno (~36%), el cual tiene un punto de fusión y propiedades mecánicas más altas que el Niquel [118] (elemento base de ambos recubrimientos, pero de mayor cuantía en el Nitec); y esto no permite que las partículas se fundan de manera similar que en el Nitec lo que genera una superficie menos homogénea y por ende una alta rugosidad. En el caso del Metaceram se evidencia también que al aumentar la temperatura, la rugosidad tiende a estabilizarse cerca a los 500 – 550°C, ya que éste es el límite de temperatura que debe tener la superficie antes de proyectar el recubrimiento de acuerdo al fabricante [9, 80, 101].

4.2 Evaluación de la resistencia al desgaste y a la adherencia de los recubrimientos:

4.2.1 Nitec

4.2.1.1 Dureza:

Para realizar la prueba de microdureza Knoop las probetas se pulieron con varias lijas (300, 600, 800, 1600) hasta dejar homogénea la superficie (en algunos casos totalmente al espejo ya que luego se pulió con paño y alúmina líquida (0,5 μm) y fuera visible la huella del indentador. Para la toma de datos se realizaron 5 tomas diferentes por probeta con una carga alta de 300gr; el equipo se configuro con 500x y luego se calculo el promedio de cada probeta.

En la figura 4.16 Se aprecian los promedios de microdureza Knoop para las muestras de Nitec a temperaturas de 300, 400 y 500°C y en la figura 4.17 se aprecian los promedios de dureza en grados Knoop con respecto a la rugosidad del recubrimiento de Nitec. Se observan medidas muy similares de dureza (309 a 314 aprox.) lo que indica un cambio poco significativo en la dureza del material.

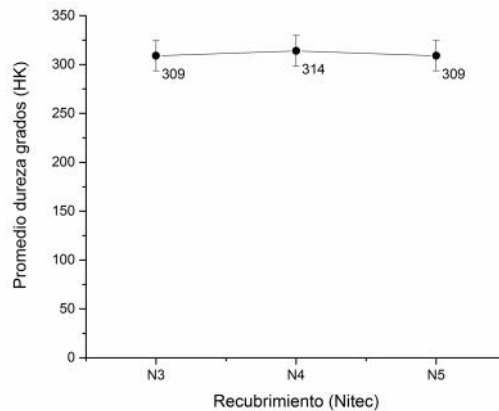


Figura 4.16 Promedios de dureza en grados Knoop recubrimiento Nitec.

A continuación en la figura 4.17 no se observa un cambio significativo en la rugosidad del material, como se había previsto, con respecto a la temperatura del sustrato al momento de realizar la proyección térmica.

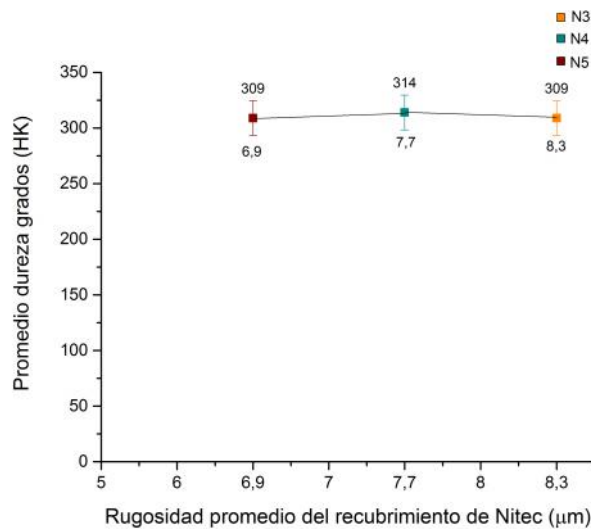


Figura 4.17 Promedios de dureza en grados Knoop vs. Promedios de rugosidad en micrómetros para el recubrimiento Nitec.

4.2.1.2 Desgaste Abrasivo y adhesivo:

4.2.1.2.1 Abrasión a tres cuerpos:

Para el análisis del desgaste abrasivo se procedió a medir la tasa de desgaste del sustrato y obtener valores iniciales que se compararán con los resultados de los recubrimientos. En la figura 4.18 se muestran los valores de los promedios de dureza en grados Knoop contra pérdida de peso en gramos, para los recubrimientos de Nitec. Se aprecia que en el recubrimiento de N3 el índice de desgaste fue menor que en los depositados N4 y N5. Claro está que la dureza, el desgaste del sustrato en gramos fueron menores y por lo tanto la pérdida de volumen también será menor que la de los recubrimientos de Nitec.[21]

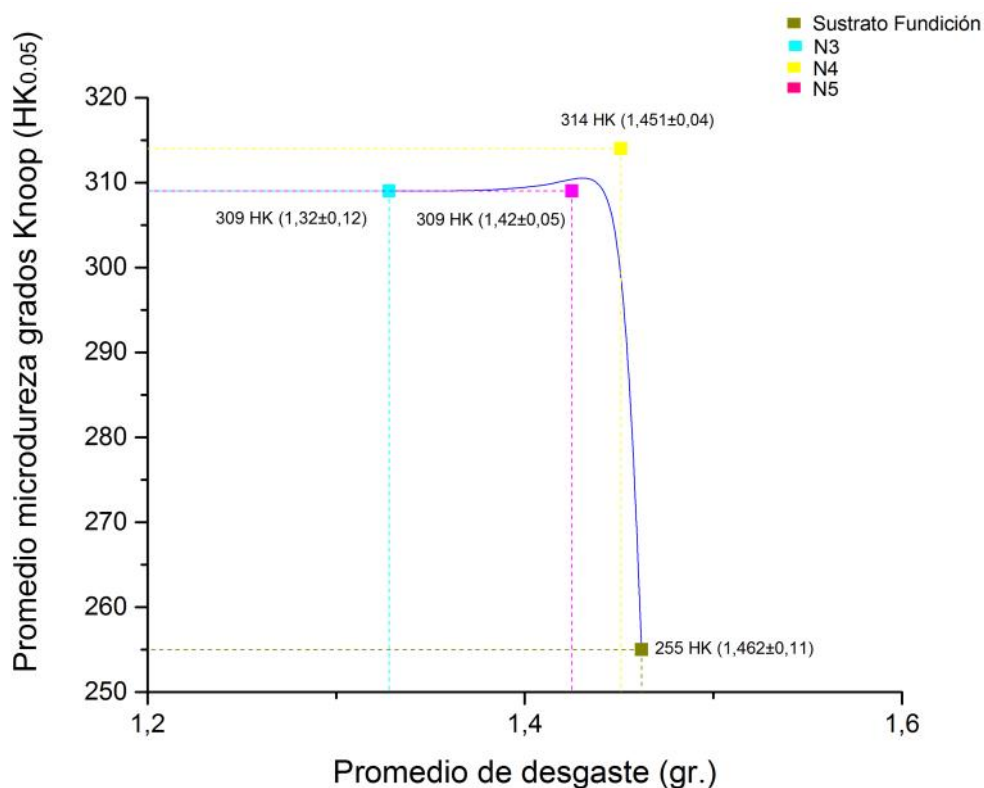


Figura 4.18 Promedios microdureza en grados Knoop contra desgaste en gramos recubrimiento Nitec.

En la figura 4.19 se muestran las graficas del volumen desplazado en mm^3 contra microdureza en Knoop en los rangos de temperatura de 300, 400 y 500°C. Con el fin de determinar el mecanismo de desgaste que se presenta en la prueba de abrasión se siguió la metodología hecha por Liang Fang y colaboradores [21][17], donde se baso en hacer gráficas de pérdida de volumen contra dureza y con ayuda de microscopías SEM analizó las zonas donde hay desgaste por esfuerzos cortantes y desgaste adhesivo. La misma metodología fue aplicada mediante diferentes ensayos de desgaste, relacionándolos con las durezas y determinando su relación, por G.J. Gore y colaboradores [80]. En Ambas investigaciones se estudió la influencia que tiene el desgaste a tres cuerpos sobre diferentes sustratos, observando también el efecto que tiene sobre la dureza promedio.

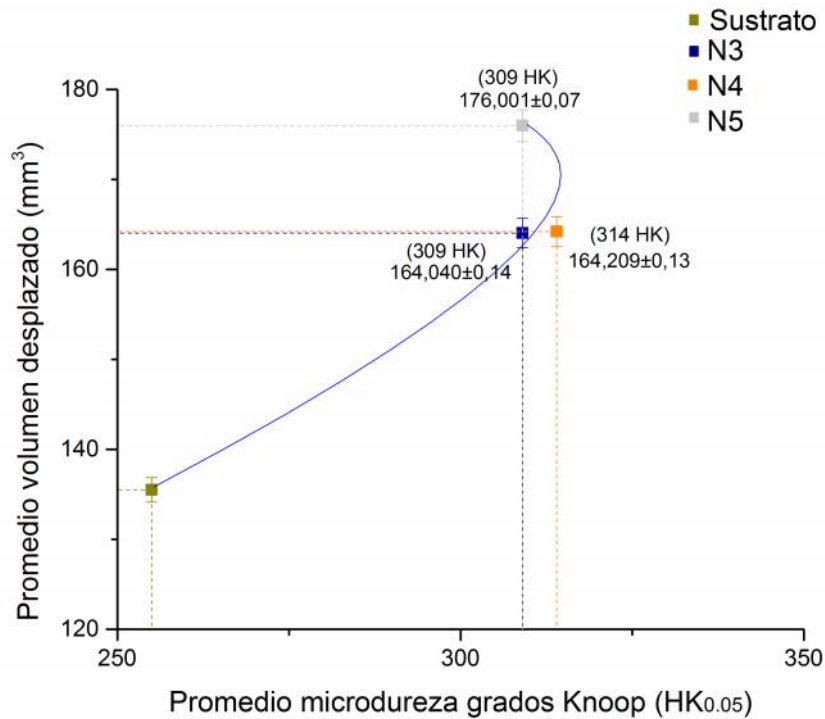


Figura 4.19 Promedios de desgaste en gramos recubrimiento Nitec.

4.2.1.2.2 Adherencia (Scratch Test):

Las pruebas de adherencia se realizan mediante la prueba de rayado (scratch test) después de realizar un corte transversal de la muestra y realizando un pulido al espejo para evitar errores en la prueba. [78]. Las pruebas de rayado se hicieron con presiones de 5N, 10N, 15N y 25 N, un avance de 4mm/min, y 2mm de desplazamiento total.

Gracias al uso de un analizador de imágenes fue posible medir el espesor promedio del recubrimiento de Nitec de las muestras a cada una de las temperaturas del sustrato correspondientes a 300, 400 y 500°C respectivamente. En la figura 4.20 se pueden apreciar las medidas utilizadas del espesor del recubrimiento para cada una de las muestras N3, N4 y N5 en a), b) y c) correspondientemente. Se representan en la figura 4.21 los valores promedio de la microdureza en grados Knoop vs. los espesores de los recubrimientos de Nitec en micrómetros.

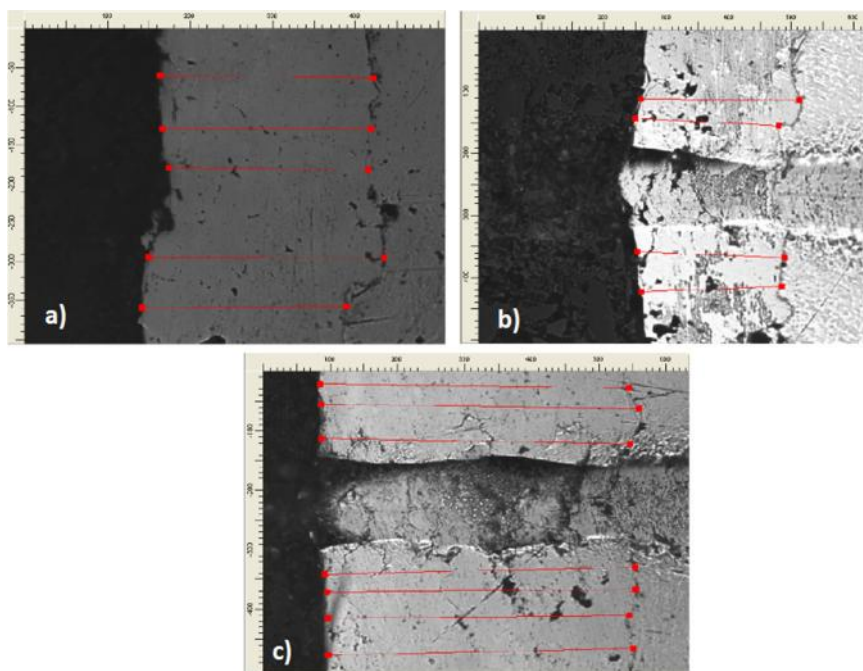


Figura 4.20 Espesores del recubrimiento a)N3, b)N4 y c)N5.

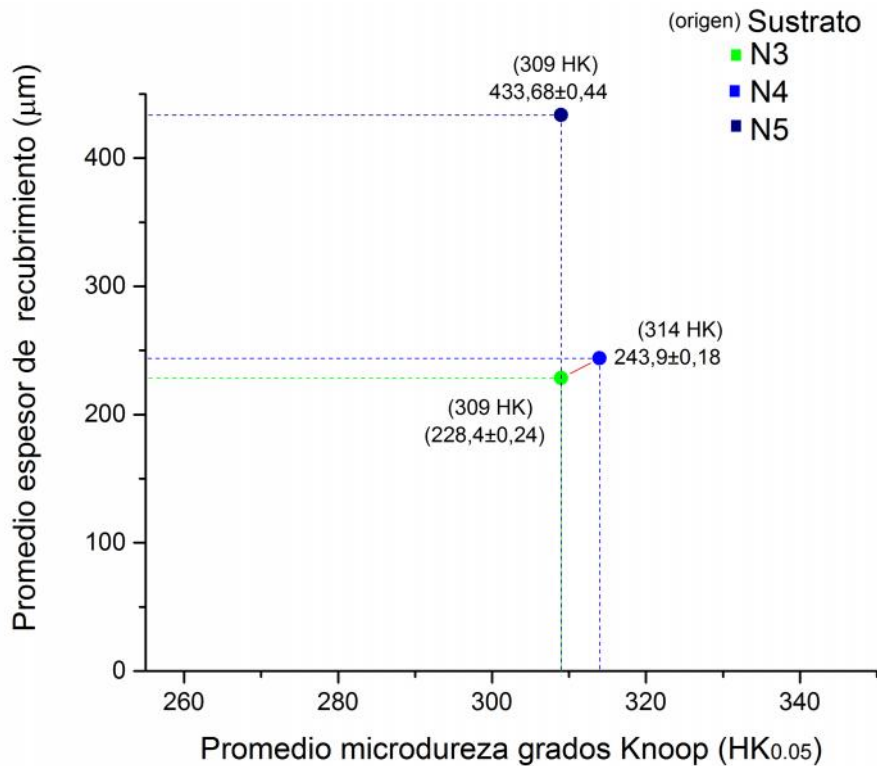


Figura 4.21 Valores promedio de los espesores del recubrimiento Nitec en micrómetros vs microdureza en grados Knoop.

Con el fin de determinar el mecanismo de desgaste de las pruebas de rayado, se determinaron las áreas de los conos proyectados que la prueba deja luego de realizar el ensayo.[36]

Para determinar la calidad de la capa del recubrimiento se determina con la resistencia entre los enlaces de adherencia y normalmente falla entre la interface recubrimiento-sustrato, mientras la fuerza de cohesión nos determina el comportamiento del recubrimiento al desgaste que es estudiada en la superficie del recubrimiento y se mide con la proyección del área del cono la cual se calcula con la ecuación 1.1 [21][36].

En tabla 15 se aprecian las áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Nitec 10224 sobre fundición gris, para cargas aplicadas de 5 N y 10 N, 15 N y 25N. Los datos fueron obtenidos para los recubrimientos N3, N4 y N5 en micrómetros cuadrados (μm^2). Los datos que no fue posible obtener están representados con 4 X (XXXX), esto debido a factores como la alta porosidad de la superficie.

Tabla 15 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Nitec 10224.

N3	5N	10N	15N	25N
	6812	10320,8	25198,5	21775
N4	5N	10N	15N	25N
	XXXX	11741,25	18779	74490
N5	5N	10N	15N	25N
	9715	20336	22021,5	36979,5

Así mismo fue posible determinar las áreas proyectadas promedio de las pruebas a 5, 10, 15 y 25N. Para así poder interpretar mediante la tabla 16 donde se observan los valores promedio de las áreas; la figura 4.22 en la cual se observa el promedio de las áreas de los conos para cada una de las cargas (μm^2) en función de la carga (N), y en la figura 4.23 se aprecian los promedios para cada una de las temperaturas del sustrato antes de la proyección térmica.

Tabla 16 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Nitec 10224

Carga (N)	Área (μm^2)
5	5509
10	14132,68333
15	21999,66
25	44414,83

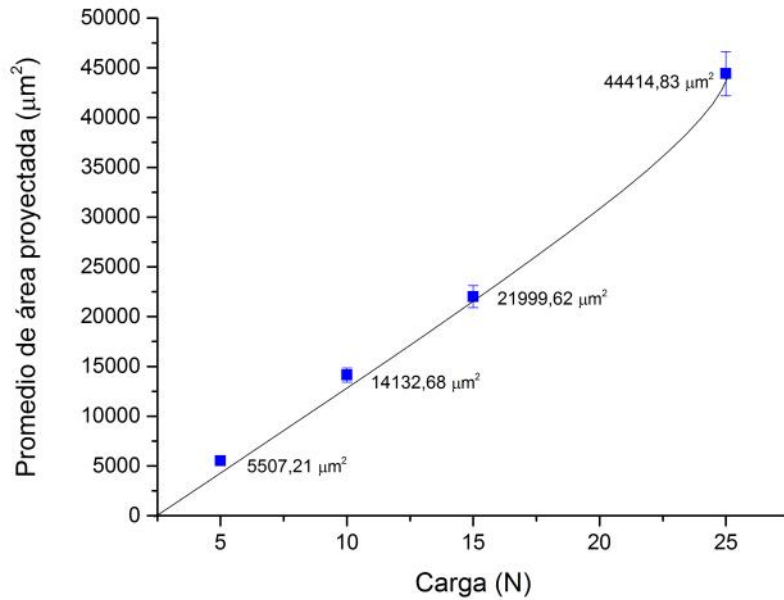


Figura 4.22 Área del cono en función de la carga aplicada.

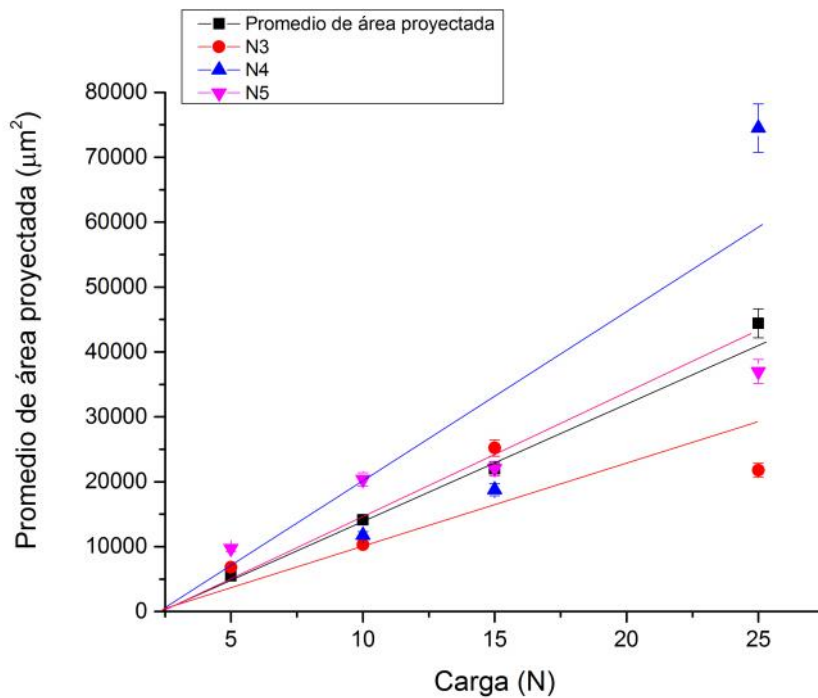


Figura 4.23 Área del cono en función de la carga aplicada promedio y para cada una de las temperaturas del sustrato antes de la deposición.

Se observa que el comportamiento del área del cono vs. la carga es exponencial, así que a mayor carga aplicada, mayor será el área del cono exponencialmente. Aunque no se aprecia muy bien el desarrollo exponencial de la gráfica, se confirma con los datos obtenidos por Borik F. y colaboradores [67], además de Burton. A y colaboradores [68]. Como apreciamos en la figura 4.24 en la mayoría de las muestras, el cono se origina en el recubrimiento y podría caracterizarse como cohesión. Sin embargo, en los recubrimientos más delgados (espesor 300 μm), se observan grietas que se levantaron sobre la interface sustrato / recubrimiento lo que indicaría adhesión; al interactuar con carga altas fue posible una observación más clara como se aprecia en la figura 4.25.

En tales casos, tanto la adhesión y la cohesión se caracterizaron aunque sólo la cohesión podría ser cuantificada mediante el cálculo de la superficie de cono como la de la figura 4.25 Estos datos concuerdan con los trabajos hechos por Novaha J., Bulletin A y sus colaboradores [36, 42]

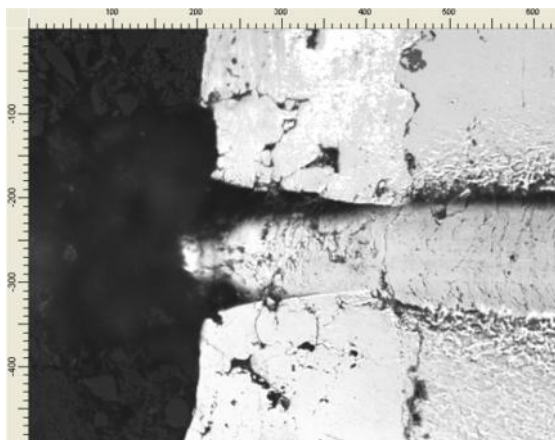


Figura 4.24 Cono en N4 con carga de 15N.

Entonces de acuerdo al trabajo realizado por Novaha J. y colaboradores [42], un cono formado en la interfaz sustrato/recubrimiento, o un desprendimiento del recubrimiento indicaría una falla adhesiva, mientras un cono formado en el recubrimiento indicaría una falla cohesiva. Así que de acuerdo a éstas imágenes analizadas se observa un cono en el recubrimiento lo que supone una falla cohesiva. Y debido a esto una baja cohesión

debida a la solidificación rápida de las partículas proyectadas serían un resultado de la tensión residual del recubrimiento. [15]

Como los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica son tan porosos, la huella de la prueba de rayado se ve influenciada en cuanto a los resultados con respecto a la deformación plástica; ya que entre más poroso sea el material mayor será su deformación plástica. Éstos datos concuerdan con los obtenidos por Erickson L. [47], En la figura 4.25 se puede observar éste fenómeno a cada lado de la huella de rayado y así mismo se aprecia que la interfaz recubrimiento/sustrato no hubo partículas de desgaste, desprendimiento del recubrimiento o formación de cono, lo que demuestra que hay ausencia de falla de tipo adhesivo.

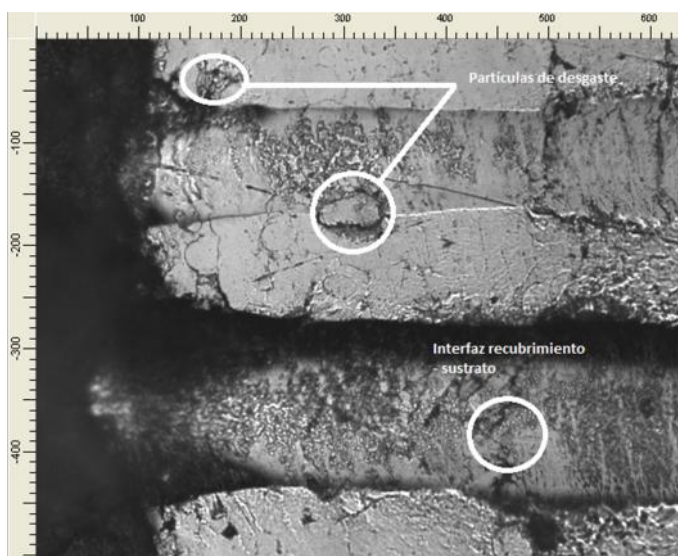


Figura 4.25 Micrografías de la prueba de rayado, partículas de desgaste e interfaz

4.2.1.2.3 Pin on disk

También se mide el Coeficiente de fricción (COF) promedio del ensayo pin on disk de los ensayos de 30 minutos para cada una de las temperaturas de deposición del Nitec como se observa en la figura 4.26 Se aprecian las curvas de COF para cada una de las

temperaturas del recubrimiento Nitec para las probetas de N3, N4 y N5. El valor más alto se aprecia en el sustrato y el más bajo en N4; esto indica que los valores promedio de COF sobre N3 y N4 son menores y así mismo la superficie depositada de Nitec es isotrópica y homogénea; mientras que en N5 la superficie depositada se observó porosa y heterogénea. En la figura 4.27 es apreciable el promedio de los coeficientes de fricción. Esto concuerda con los datos encontrados por Rahul Premachandran Nairy colaboradores [14].

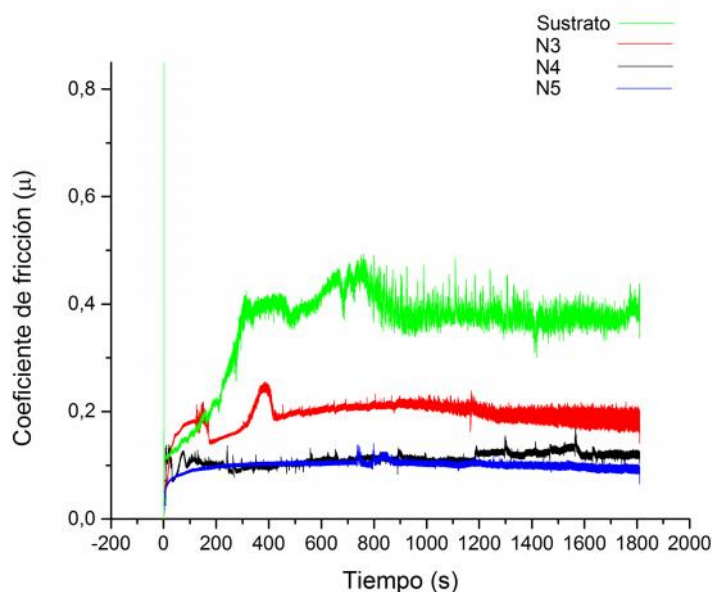


Figura 4.26 Coeficientes de fricción vs tiempo para la prueba de pin on disk .

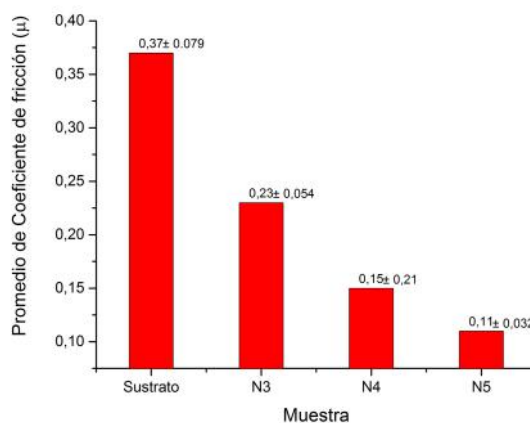


Figura 4.27 Promedios de coeficiente de fricción en el Sustrato, N3, N4 y N5 respectivamente para la prueba de pin on disk.

4.2.1.3 Confocal:

Luego de realizar las pruebas de abrasión a tres cuerpos sobre los recubrimientos de Nitec se analizaron en el microscopio confocal las huellas dejadas por la prueba para posteriormente analizar los promedios de rugosidad y compararlos con los de otras investigaciones. En la figura 4.28 se aprecian los surcos de la huella dejada luego de la prueba de abrasión a tres cuerpos.

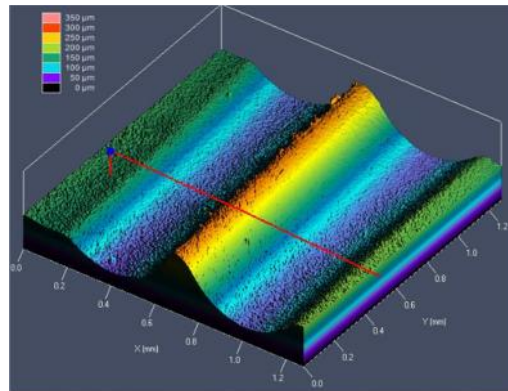


Figura 4.28 Microscopía confocal del desgaste abrasivo a tres cuerpos del recubrimiento Nitec.

En la figura 4.29 se observan los valores de los promedios de la rugosidad media Ra en μm y promedio de desgaste en gramos contra el tipo de material, sustrato, N3, N4 y N5. La gráfica es tipo Y – Y para analizar la evolución de la Rugosidad y el desgaste respecto a la prueba de abrasión a tres cuerpos según la norma ASTM G65 [4]. Según se observa, la evolución es directa y proporcional para cada una de las muestras, comenzando por el sustrato que tiene los valores más bajos y en N5 el valor más alto. Esto indicaría que si se aumenta la temperatura del sustrato antes de realizar la proyección térmica, aumenta también directa y proporcionalmente la rugosidad y el desgaste; estos datos coinciden con los investigados por Fang L. y colaboradores [17]; y los datos obtenidos por Hincapie W. [21].

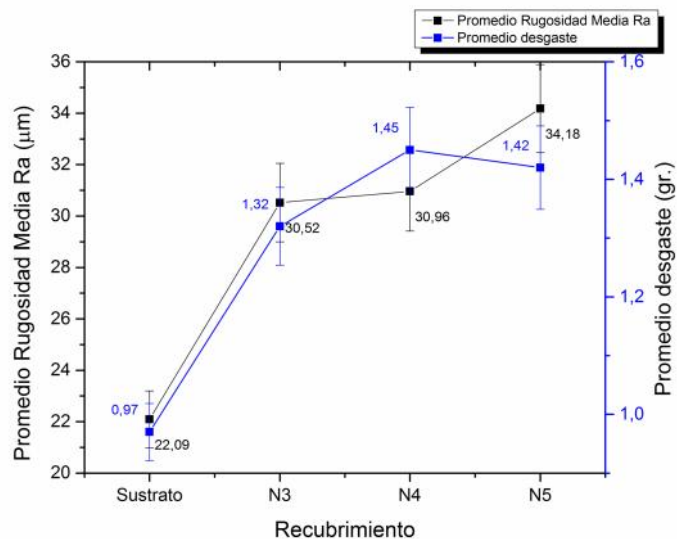


Figura 4.29 Promedio de la rugosidad media y promedio desgaste vs. Material.

Luego de realizar las microscopías confocales de la superficie se pulieron las probetas al espejo para apreciar mejor la huella del ensayo pin on disk como se observa en la nfigura 4.30.

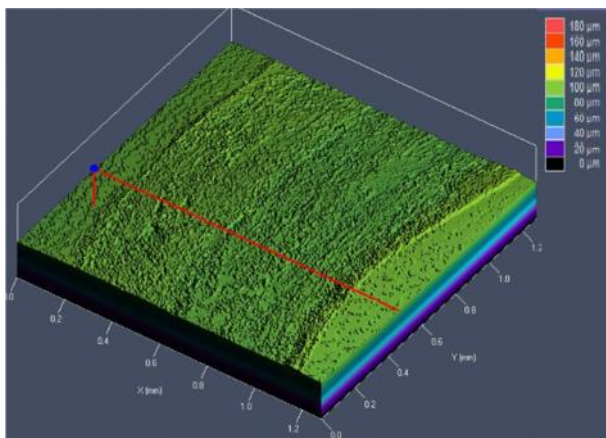


Figura 4.30 Microscopía Confocal de la superficie Nitec con huella de pin on disk.

Gracias a éste método de observación de las huellas del ensayo pin on disk, se puede analizar la rugosidad media de los ensayos de pin on disk para cada una de las temperaturas de deposición del sustrato como se observa en la figura 4.31. Se aprecian los valores de rugosidad tanto de la huella como sin huella del ensayo pin on disk para e.

sustrato y los recubrimientos luego de realizar un acabado al espejo. El valor más alto se aprecia en el sustrato y N4; el más bajo en el N3; esto indica que el valor medio de la rugosidad superficial sobre el sustrato de N3 y N5 es menor y así mismo el desgaste fue abrasivo y menor en estas probetas también. Esto concuerda con los datos encontrados por Hincapie W. y colaboradores [21].

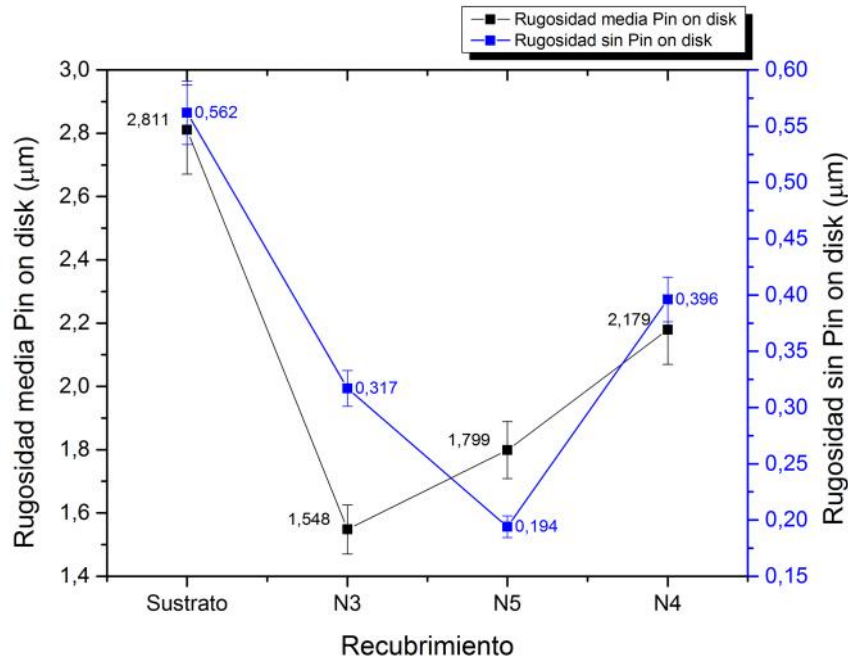


Figura 4.31 Promedios de rugosidad media pin on disk y muestra en cada probeta de Nitec y sustrato

4.2.2 Metaceram

4.2.2.1 Dureza:

Al igual que con las probetas de Nitec, para realizar la prueba de microdureza Knoop las probetas se pulieron con varias lijas (300, 600, 800, 1600) hasta dejar homogénea la superficie y fuera visible la huella del indentador. Cabe aclarar que a diferencia del Nitec, para el Metaceram las superficies eran demasiado duras y difícilmente se podían pulir

con lijas de manera eficiente. Se optó también por rectificarlas pero no fue posible por el mínimo espesor del recubrimiento ya que en el mínimo desbaste éste desaparecía. Por lo tanto las superficies quedaron medianamente pulidas para que fuera posible realizar los ensayos.

Para la toma de datos se realizaron 5 tomas diferentes por probeta con una carga alta de 300gr; el equipo se dejó en el número dos con 500 aumentos y luego se calculó el promedio de dureza de cada tipo de probeta.

En la figura 4.32 se aprecian los promedios de dureza a temperaturas de sustrato antes de la proyección térmica de 300, 400 y 500°C. Se promediaron medidas de dureza muy diferentes (295 a 927+ aprox) lo que indica un cambio muy significativo en la dureza del material. Esto se debe al cambio de materiales en la composición que hay en el recubrimiento de Metaceram, ya que en algunas zonas sobre la superficie se encontrarán rastros de Niquel (dureza aprox. Ni 285 HK)[122] y en otras zonas carburos de Tungsteno (dureza aprox. WC 970 HK)[9,123].

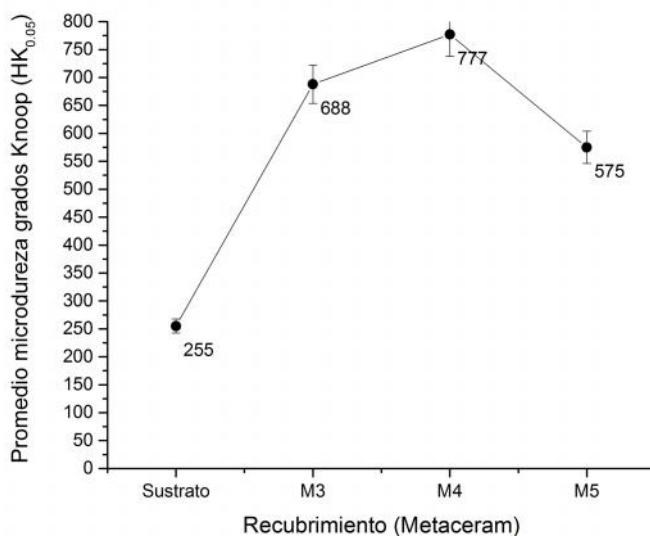


Figura 4.32 Promedios de dureza en grados Knoop vs Recubrimiento.

En la figura 4.33 se observan los promedios de microdureza dureza Knoop vs la rugosidad promedio para las muestras de. Se observó un aumento de rugosidad

inversamente proporcional a la temperatura del sustrato antes de la proyección; también se aprecia inversamente proporcional a la microdureza.

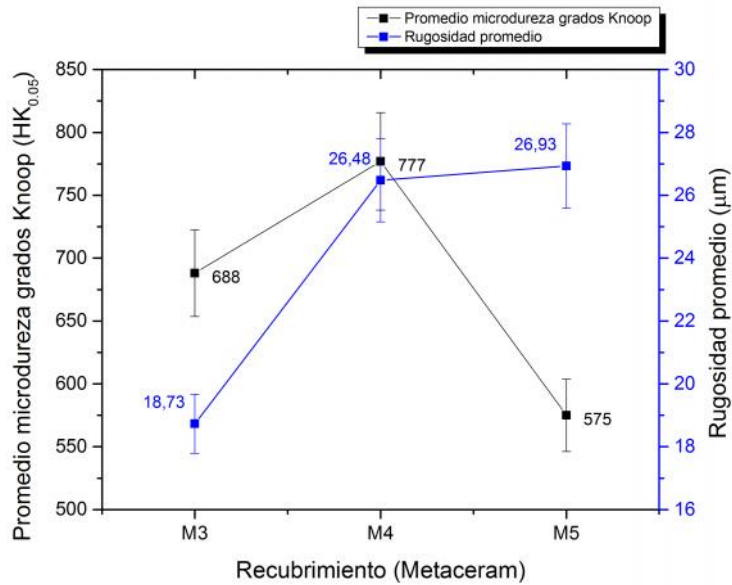


Figura 4.33 Promedios de dureza en grados Knoop y rugosidad del recubrimiento Metaceram.

4.2.2.2 Desgaste Abrasivo y adhesivo:

4.2.2.2.1 Abrasión a tres cuerpos:

Para el análisis del desgaste abrasivo, al igual que con el Nitec, se procedió a medir la tasa de desgaste del sustrato y obtener valores iniciales que se compararán con los resultados de los recubrimientos. En las figura 4.34 se muestran los valores de temperatura contra pérdida de peso en gramos, para los recubrimientos de Metaceram. Se aprecia que en el recubrimiento M3 el índice de desgaste fue menor que en los depositados M4 y M5.

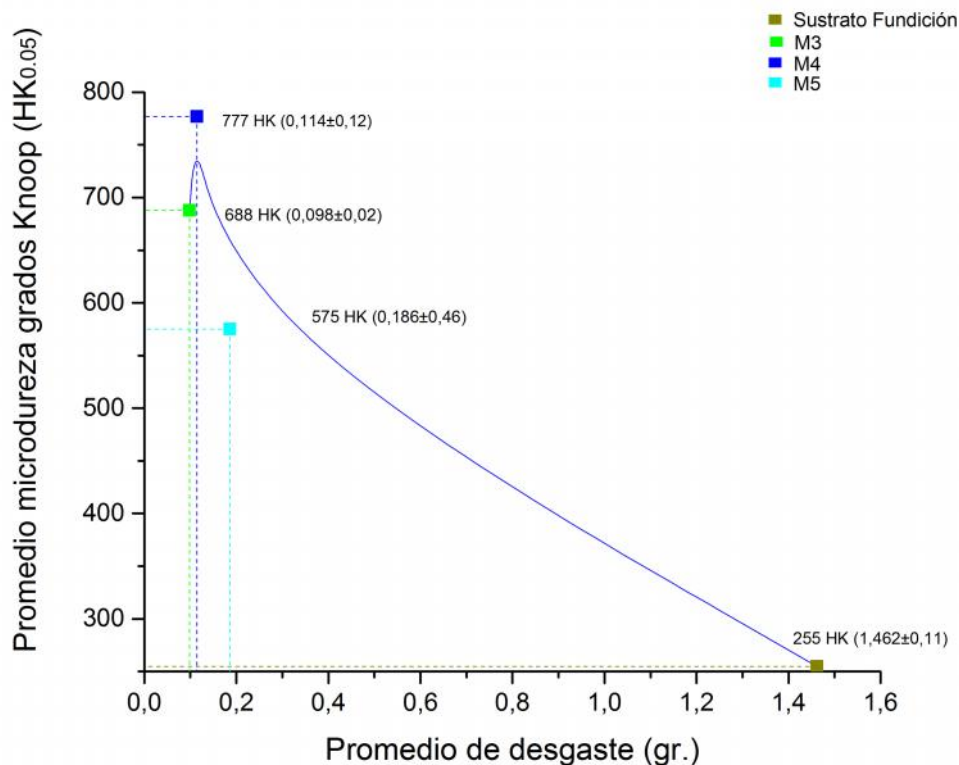


Figura 4.34 Promedios de dureza en grados Knoop vs promedio desgaste en gramos.

En la figura 4.35 se observan las gráficas del volumen desplazado en mm^3 contra dureza en Knoop para el sustrato y en los rangos de temperatura de 300, 400 y 500°C. Con el fin de determinar el mecanismo de desgaste que se presenta en la prueba de abrasión se siguió la metodología hecha por Liang Fang y colaboradores [21][22], donde se basó en hacer gráficas de pérdida de volumen contra dureza y con ayuda de microscopías SEM se analizaron las zonas donde hay desgaste por esfuerzos cortantes y desgaste adhesivo. La misma metodología fue aplicada mediante diferentes ensayos de desgaste, relacionándolos con las durezas y determinando su relación, por G.J. Gore y colaboradores [23]. En Ambas investigaciones se estudió la influencia que tiene el desgaste a tres cuerpos sobre diferentes sustratos, observando también el efecto que tiene sobre la dureza promedio. Se utilizó la misma metodología desarrollada para el

recubrimiento de Nitec teniendo en cuenta que el ensayo de desgaste abrasivo arrojó óptimos resultados como se observa en la figura 4.28.

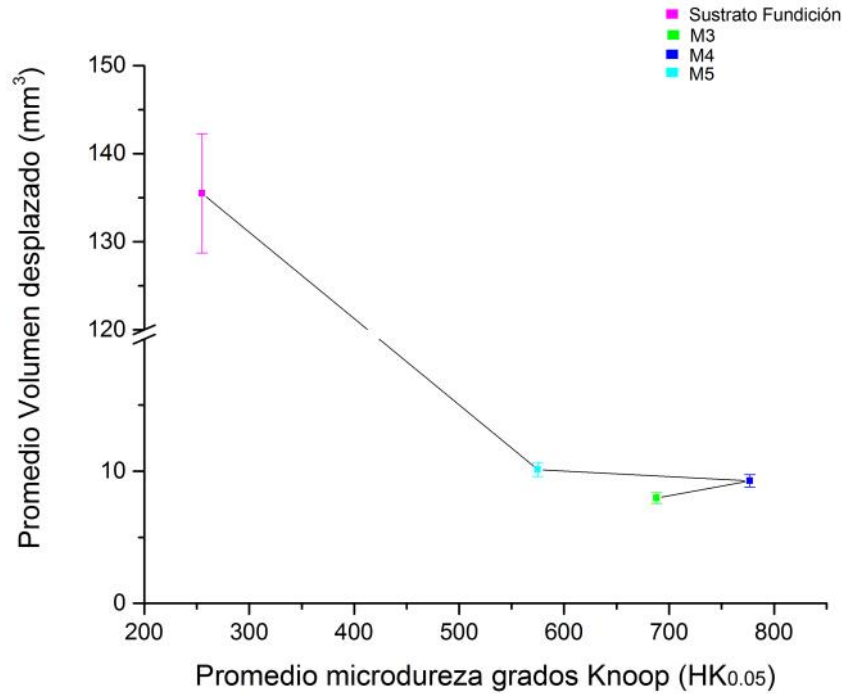


Figura 4.35 Promedios de desgaste en gramos recubrimiento Metaceram vs Dureza

4.2.2.2.2 Adherencia (Scratch Test):

Como se mencionó en la parte de caracterización de la prueba de adherencia para Nitec, fue necesario cortar transversalmente y dejar las probetas al espejo y aún así se dificultó la toma de medidas para las áreas de los conos de los recubrimientos de Metaceram por su alta porosidad y dureza como lo veremos más adelante. Las pruebas de rayado se hicieron con presiones de 5N, 10N, 15N y 25 N, un avance de 4mm/min, y 2mm de desplazamiento total al igual que en el Nitec.

Gracias al uso de un analizador de imágenes fue posible medir el espesor promedio del recubrimiento de Metaceram de las muestras a cada una de las temperaturas del sustrato correspondientes a 300, 400 y 500°C respectivamente. En la figura 4.36 se pueden apreciar las medidas utilizadas del espesor del recubrimiento para cada una de las muestras M3, M4 y M5 en a), b) y c) correspondientemente.

También se aprecian los espesores del recubrimiento de Metaceram para cada una de las temperaturas de deposición, de la prueba de rayado en M3, M4 y M5 con las líneas de medición respectivamente. En la 4.37 se observan los valores promedio de los espesores de los recubrimientos de Metaceram en micrómetros representados en la 4.36.

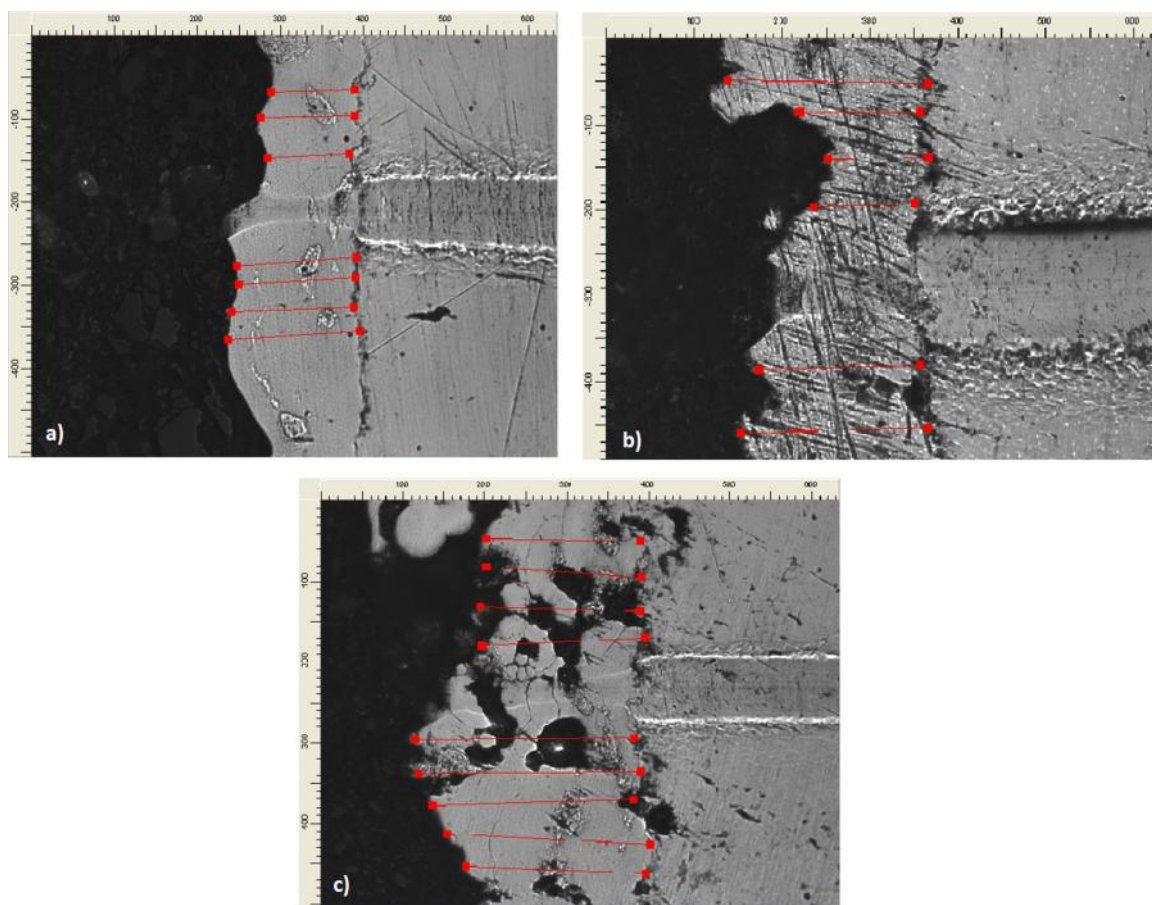


Figura 4.36 Espesores del recubrimiento a)M3, b)M4 y c)M5

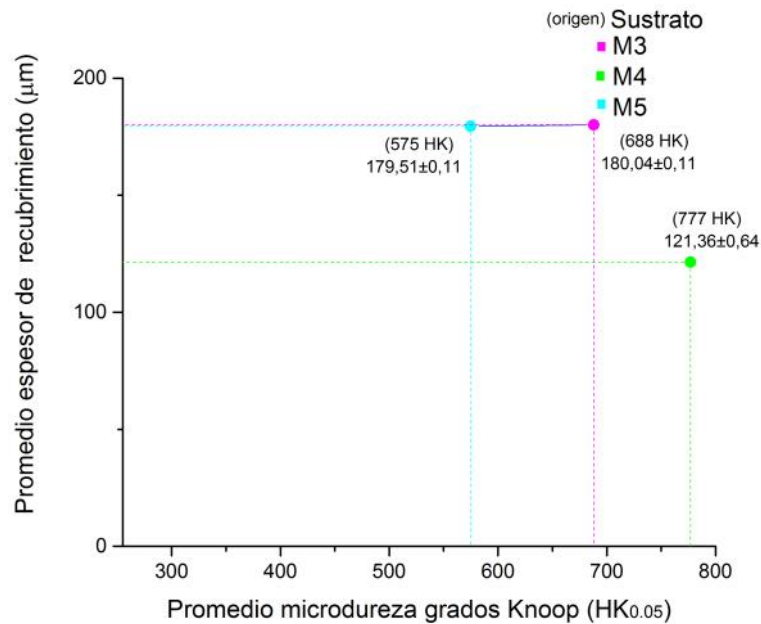


Figura 4.37 Promedio de los espesores de Metaceram en micrómetros

Al igual que con las pruebas sobre el recubrimiento de Nitec con el fin de determinar el mecanismo de desgaste de las pruebas de rayado, se determinaron las áreas de los conos proyectados que la prueba deja luego de realizar el ensayo.[36] Para determinar la calidad de la capa del recubrimiento se determina con la resistencia entre los enlaces de adherencia y normalmente falla entre la interface recubrimiento-sustrato, mientras la fuerza de cohesión nos determina el comportamiento del recubrimiento al desgaste que es estudiada en la superficie del recubrimiento y se mide con la proyección del área del cono la cual se calcula con la ecuación 1.1 [21][36].

En tabla 17 se aprecian las áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Metaceram 23075 sobre fundición gris, para cargas aplicadas de 5 N y 10 N, 15 N y 25N. Los datos fueron obtenidos para los recubrimientos M3, M4 y M5 en micrómetros cuadrados (μm^2); y al igual que con el recubrimiento de Nitec algunos valores no fueron posibles de obtener debido a la alta porosidad del recubrimiento y son representados por (XXXX).

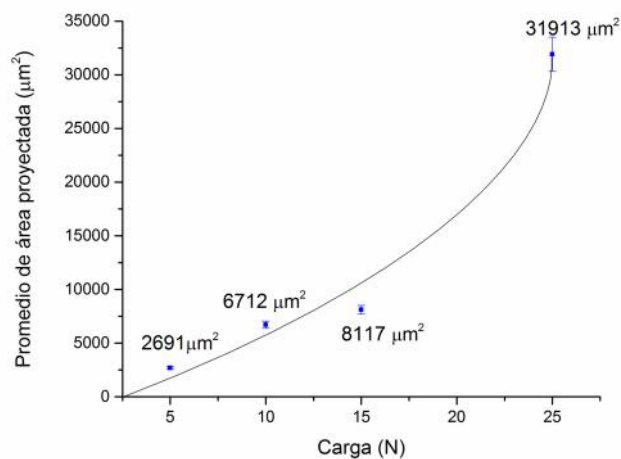
Tabla 17 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Metaceram 23075

M3	5N	10N	15N	25N
	1547,32	6711,95	9177,6	17491,5
M4	5N	10N	15N	25N
	XXXX	XXXX	3448,5	19494,5
M5	5N	10N	15N	25N
	3835,25	XXXX	11724,5	58752,5

Al igual que las pruebas con Nitec, se determinaron las áreas proyectadas promedio de las pruebas a 5, 10, 15 y 25N. Para así poder interpretar mediante la tabla 18, donde se observan los valores promedio de las áreas; la figura 4.38 en la cual se observa el área del cono (μm^2) en función de la carga (N).

Tabla 18 Áreas proyectadas de los conos del recubrimiento Metaceram 23075

Carga (N)	Área (μm^2)
5	2691,285
10	6711,95
15	8116,86667
25	31912,8333

**Figura 4.38 Área del cono en función de la carga aplicada.**

Se observa que el comportamiento es exponencial al igual que con el Nitec, así que a mayor carga aplicada, mayor será el área del cono exponencialmente [67, 68]. Como apreciamos en la figura 4.24 en la mayoría de las muestras, el cono se origina en el recubrimiento y podría caracterizarse como cohesión. Sin embargo, en los recubrimientos más delgados (espesor 300 μm), se observan grietas que se levantaron sobre la interface sustrato / recubrimiento y al interactuar con carga altas fue posible una observación más clara como se aprecia en la figura 4.39. En tales casos, tanto la adhesión y la cohesión se caracterizaron aunque sólo la cohesión podría ser cuantificada mediante el cálculo de la superficie de cono como el de la figura 4.39. Estos datos concuerdan con los trabajos hechos por Novaha J., Bulletin A y sus colaboradores [36, 42]

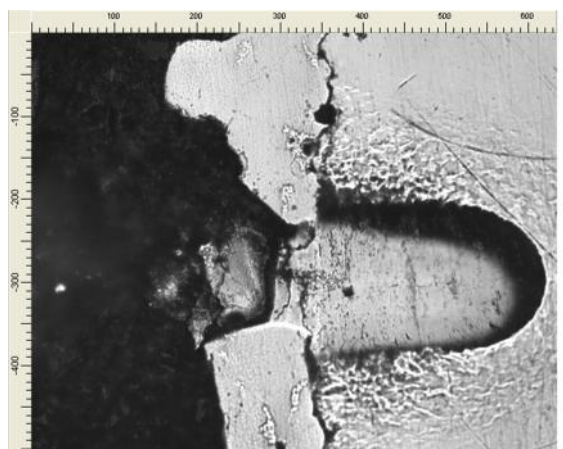


Figura 4.39 Área del cono en M3 con carga de 25N.

Entonces de acuerdo al trabajo realizado por Novaha J. y colaboradores [42], un cono formado en la interfaz sustrato/recubrimiento, o un desprendimiento del recubrimiento indicaría una falla adhesiva, mientras un cono formado en el recubrimiento indicaría una falla cohesiva. Así que de acuerdo a éstas imágenes analizadas se observa un cono en el recubrimiento lo que supone una falla cohesiva. Y debido a esto una baja cohesión debida a la solidificación rápida de las partículas proyectadas serían un resultado de la tensión residual del recubrimiento. [15]

Como los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica son tan porosos, la huella de la prueba de rayado se ve influenciada en cuanto a los resultados con respecto a la deformación plástica; ya que entre más poroso sea el material mayor será su deformación plástica. Éstos datos concuerdan con los obtenidos por Erickson L. [47], En la figura 4.40. se puede observar éste fenómeno a cada lado de la huella de rayado y así mismo se aprecia que la interfaz recubrimiento/sustrato no hubo partículas de desgaste, desprendimiento del recubrimiento o formación de cono, lo que demuestra que hay ausencia de falla de tipo adhesivo.

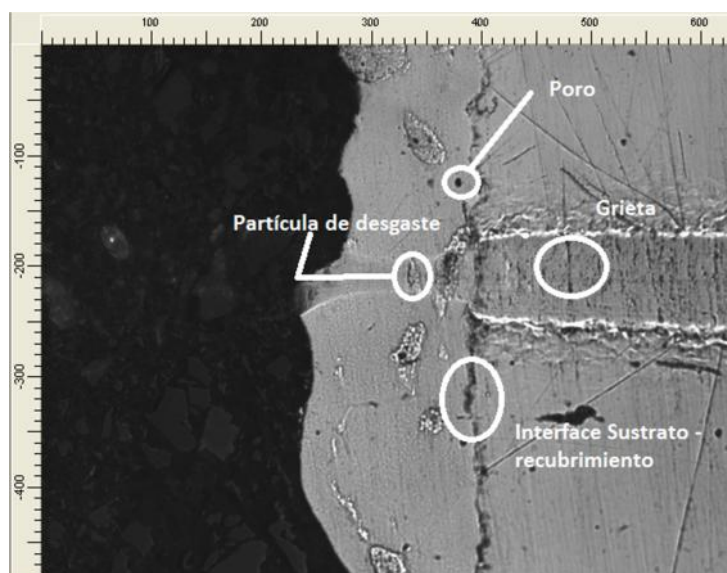


Figura 4.40 Micrografías de la prueba de rayado, partículas de desgaste e interfaz

4.2.2.2.3 Pin on disk

La medición del (COF) promedio de los ensayos pin on disk de 30 min. para cada una de las temperaturas de deposición del Metaceram se observan en la figura 4.41. Se aprecian los valores de COF promedio para las probetas de M3, M4 y M5. El valor más

alto se aprecia en M3 y el más bajo en el M5; esto indica que los valores promedio de COF sobre el sustrato de M3 son mayores y así mismo la superficie depositada de Metaceram a la temperatura de 300°C es isotrópica y homogénea; mientras que en M5 la superficie depositada se observó porosa y heterogénea. Esto concuerda con los datos encontrados por Rahul Premachandran Nairy colaboradores [14].

Al igual que los resultados observados en el Nitec, los coeficientes disminuyen al aumentar la temperatura del sustrato antes de la deposición térmica. Se aclara que el polvo de Metaceram contiene partículas de WC los cuales se pueden depositar sobre una superficie con una temperatura máxima de 550°C aproximadamente, mientras que el Nitec se deposita máximo a 350 °C aproximadamente, por lo tanto el Metaceram no ha perdido sus propiedades mecánicas y los polvos se han fundido en su totalidad a 500°C.[8][9].

También es apreciable un aumento proporcional del coeficiente de fricción (COF) promedio con respecto a la temperatura del sustrato para los recubrimientos de Metaceram en la figura 4.42.

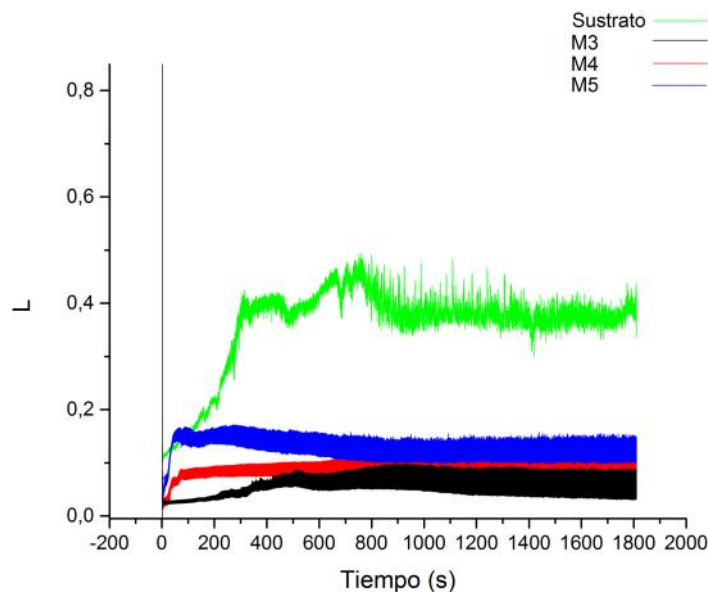


Figura 4.41 Promedios de coeficiente de fricción en M3, M4 y M5 respectivamente para la prueba de pin on disk

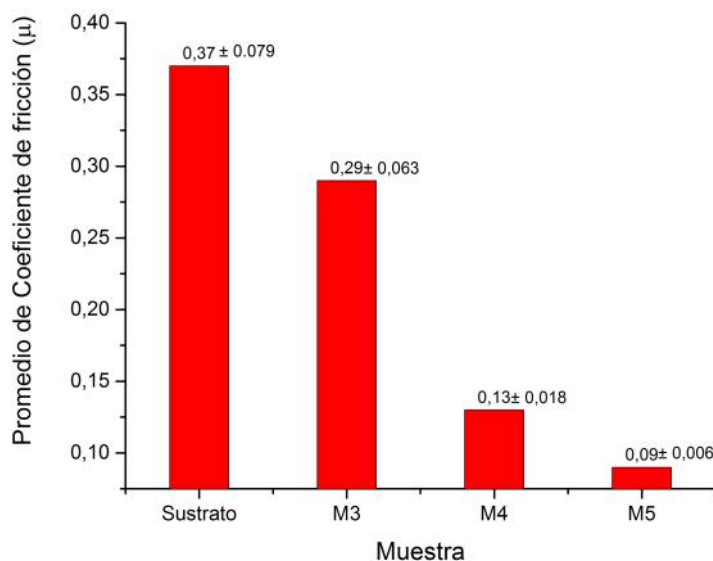


Figura 4.42 Promedios de coeficiente de fricción en M3, M4 y M5 respectivamente para la prueba de pin on disk

4.2.2.3 Confocal:

Después de haber realizado las microscopías confocales de las superficies; se intentaron pulir las probetas al espejo para apreciar mejor la huella del ensayo pin on disk. Al igual que en el subcapítulo de dureza, se intentó dejar las probetas lo mejor posible para realizar las pruebas de desgaste. Luego de realizar el ensayo de pin on disk sobre las superficies de metaceram se determinó que la porosidad de la superficie y la dureza de la misma no permitieron una marca apreciable en el microscopio confocal, la huella fue medida en el ensayo como se observa en la figura 4.43 y fotografiada para su apreciación en anexos.

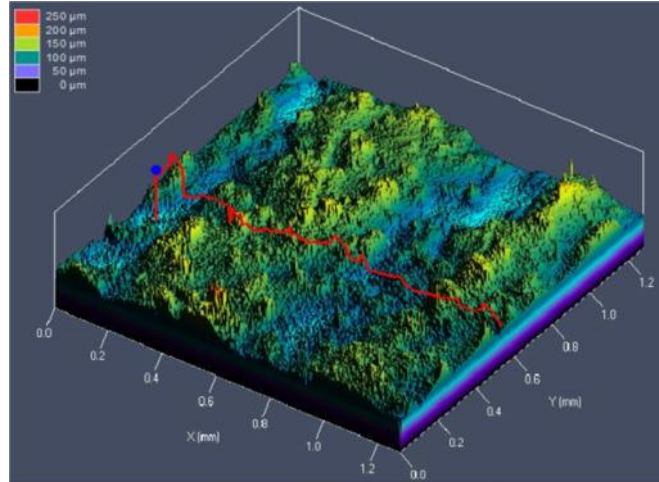


Figura 4.43 Microscopía confocal del recubrimiento metaceram después del ensayo de abrasión.

Luego de la observación de las huellas del ensayo pin on disk, no fue posible analizar la rugosidad media de los ensayos para cada una de las temperaturas de deposición del sustrato mediante microscopía confocal como se aprecia en la figura 4.44. Esto se debe principalmente a la alta rugosidad superficial y la porosidad del recubrimiento de Metaceram, por lo tanto al momento de realizar la prueba de pin on disk, el balín no tiene una superficie de contacto homogénea por lo que se desgasta y rebota sobre la superficie sin que ésta sufra cambios significativos.

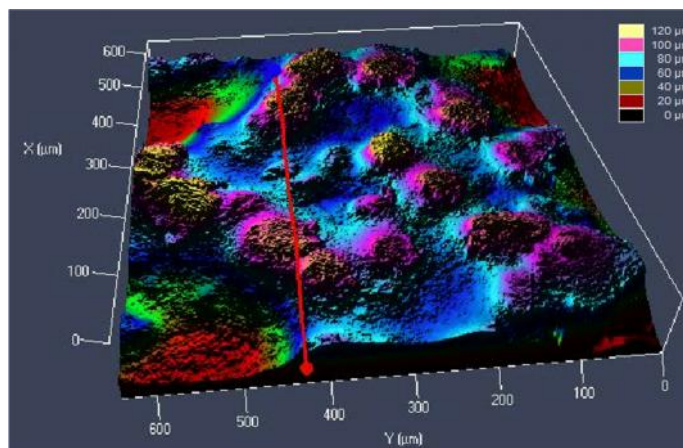


Figura 4.44 Microscopía Confocal de la superficie Metaceram sobre la huella de pin on disk

En la figura 4.45 se observan los valores de los promedios de la rugosidad media Ra en μm y promedio de desgaste en gramos contra el tipo del material, sustrato, M3, M4 y M5. La gráfica es tipo Y – Y para analizar la evolución de la Rugosidad y el desgaste respecto a la prueba de abrasión a tres cuerpos según la norma ASTM G65 [4]. Según se observa, la evolución es directa y proporcional para cada una de las muestras, después del sustrato el cual tiene una rugosidad y un promedio de desgaste mas alto. En M5 se aprecian los valores más altos, esto indicaría que si se aumenta la temperatura del sustrato antes de realizar la proyección térmica, aumenta también directa y proporcionalmente la rugosidad y el desgaste; estos datos coinciden con los investigados por Fang L. y colaboradores [17]; y los datos obtenidos por Hincapie W. [21].

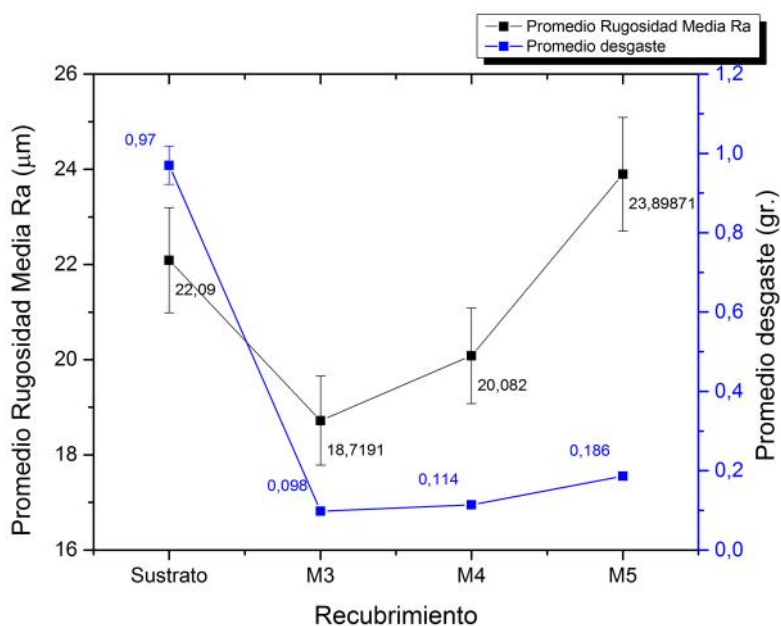


Figura 4.45 Promedio de la rugosidad media y promedio desgaste vs. Material.

4.3 Recuperación de piezas

Se añadió un capítulo de la última jornada de recuperación de piezas de la industria naval que se realizó en Cartagena, en la empresa Cotecmar, la cual es la empresa que realizó el apoyo económico junto con Colciencias. Cotecmar a través de la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación desarrolla proyectos que van desde la realización de programas de investigación, hasta el desarrollo de nuevos productos y servicios, aportando a la innovación tecnológica aplicada a procesos de la industria naval, marítima y fluvial. [132]

4.3.1 Proceso de recuperación

Cotecmar se encuentra en un entorno donde la corrosión es común, debido al entorno húmedo y salado que brinda la brisa del mar. El primer paso fue buscar piezas de la industria naval con problemas de desgaste y corrosión para recuperar mediante la técnica de proyección térmica por llama con soplete Eutalloy. Dos piezas fueron las candidatas; una tapa de protección de un motor eléctrico y la otra pieza para realizar la recuperación fue un árbol de levas de un motor Cummins de uno de los barcos el cual había sufrido desgaste normal después de su ciclo de trabajo y vida útil.

En la parte a) de la figura 4.46 se observa la tapa que luego de la oxidación sufrió una pérdida considerable de material y la opción más rápida que se tenía en el momento era la aplicación de pintura de laca para frenar en parte el problema; pero volvía a oxidarse luego de cierto tiempo como se aprecia en la parte b) y repetían el proceso sin solucionar el problema de raíz.

La proyección térmica es un proceso eficaz, rápido y confiable en estos casos si se siguen atentamente ciertos parámetros como por ejemplo la temperatura de depósito, precalentamiento del material, tipo de recubrimiento, condiciones de proyección (presiones de gases, caudales, etc.), entre otros. En la parte c) de la figura 4.46 es apreciable el proceso en marcha de precalentamiento antes de realizar la proyección sobre el árbol de levas.

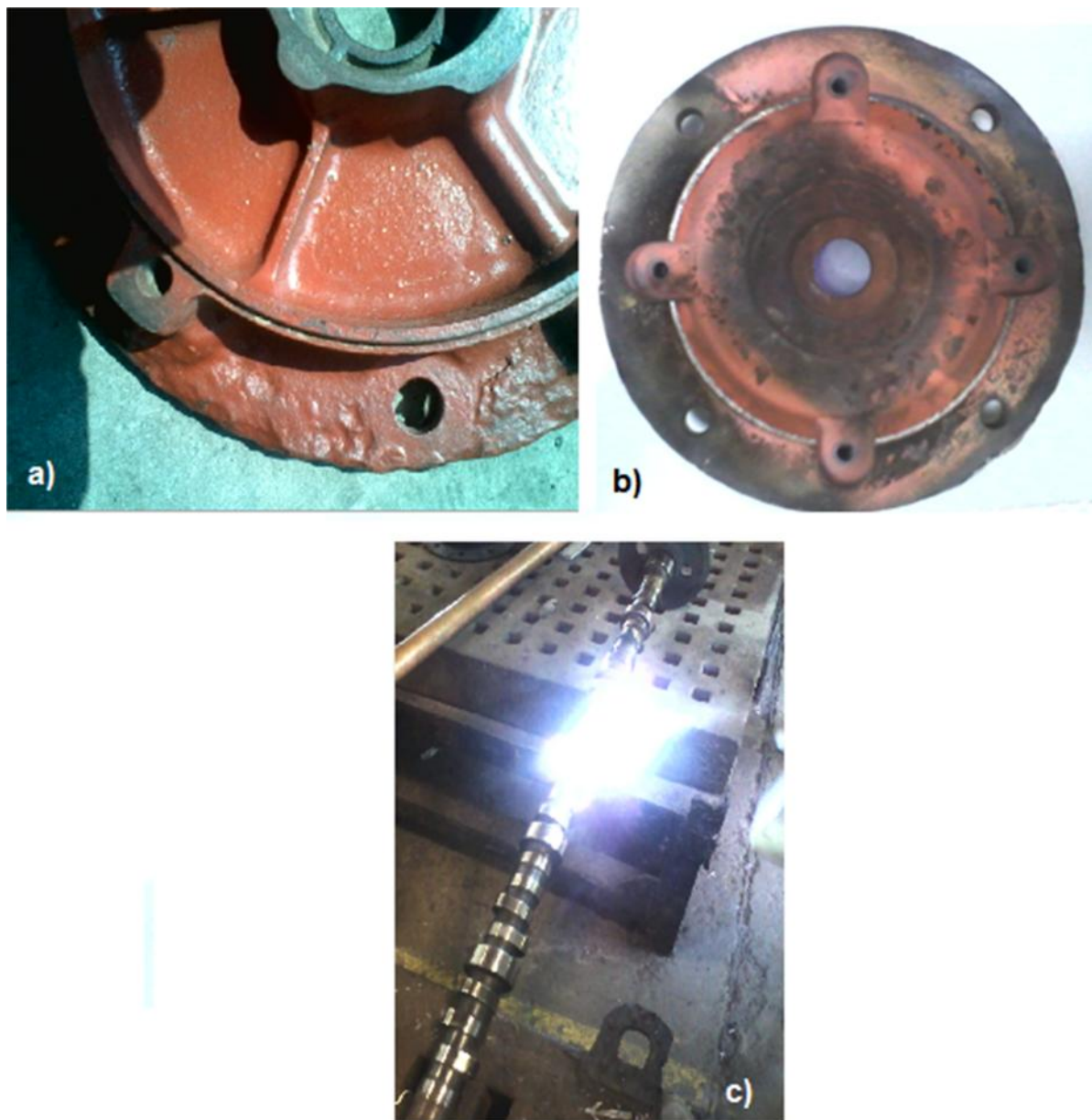


Figura 4.46 Piezas para recuperación mediante proyección térmica por llama.

Luego de encontrar las piezas se retiraron la pintura, los óxidos y demás partículas que podrían impedir la adhesión del recubrimiento, además a la tapa del motor eléctrico se le realizó un granallado con granalla de hierro para mejorar las propiedades de adhesión notablemente [21] como se aprecia en la figura 4.47.



Figura 4.47 Tapa del motor luego del granallado

Ya que en el árbol de levas solo era necesaria una pequeña cantidad de material para realizar la recuperación (por el orden de los $\sim 0,2$ mm), solo era necesaria una lijada fina para retirar óxidos superficiales y limpiar la superficie de cualquier tipo de partícula que evitara la adhesión del material.

Para realizar el procedimiento de la proyección se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de proyección:

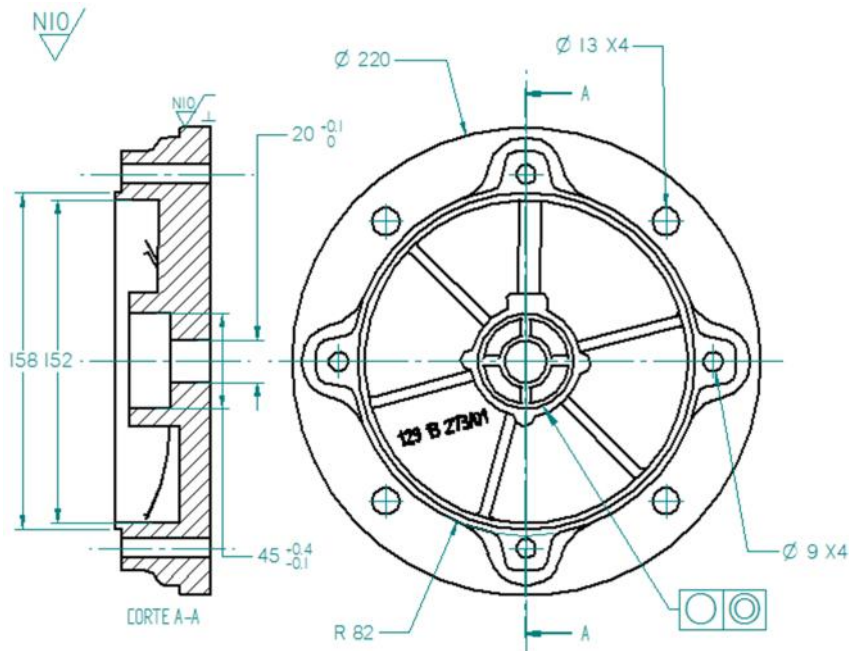
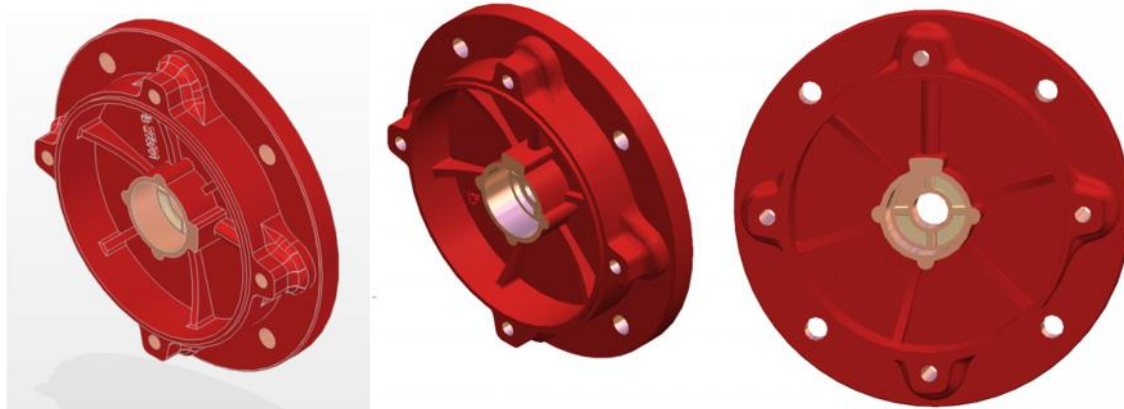
- Lanza: B3
- Presión de oxígeno: 37 Psi
- Presión de acetileno: 9 Psi
- Distancia de proyección: 100mm Aprox.

Los polvos utilizados para realizar los recubrimientos se observan en la figura 4.48 fueron a) Nitec 10224 y b) Metaceram 23075 respectivamente, que fueron los mismos polvos utilizados en el trabajo de investigación. Para realizar la recuperación del árbol de levas se uso el polvo Metaceram ya que se buscaba conseguir una resistencia alta al desgaste y éste recubrimiento tiene carburo de Tungsteno que mejora muchísimo las propiedades mecánicas y evita en gran medida el desgaste. Para la tapa del motor se uso una bicapa; primero se proyectó Metaceram y luego Nitec para mejorar las propiedades anticorrosivas. Cabe aclarar que ambos recubrimientos mejoran altamente la resistencia a la corrosión, ya que contienen Níquel en altos porcentajes y el Metaceram un pequeño porcentaje de Cromo también.



Figura 4.48 Polvos utilizados para la proyección térmica

Para realizar el proceso se documentaron las medidas y se levantaron planos de la tapa del motor eléctrico que se puede apreciar en la figura 4.49.



			Recuperación de piezas		
Dibujado	Ing. D. O'rálorc	Fecha	Cartagena - Cotecmar		
Comprobado			Universidad Nacional de Colombia		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 1 y $\pm 1^\circ$			A2	Plano 1 de 2	
			Tapa motor		Rev 1
			Escala	H	Peso:

Figura 4.49 Levantamiento de planos para la tapa del motor.

Finalmente se completó el proceso de proyección satisfactoriamente luego de realizar un torneado de la pieza, rectificación y posterior control de calidad; claro está que hubo algunos contratiempos que no permitieron una buena adherencia en las piezas, entre algunos de ellos está: el material del árbol de levas que contenía una aleación desconocida y no sabíamos que reacción tendría el Metaceram sobre él que se desprendía constantemente, la geometría y volumen del árbol de levas que al ser precalentado para realizar la proyección térmica se enfriaba rápidamente (esto debido a la disipación rápida de calor), entre otros.

En los Anexos añadiré algunas fotografías de los daños que se presentaron al momento de realizar la proyección térmica; tanto en las probetas del trabajo de investigación, como de la jornada de recuperación de piezas en Cotecmar.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se logró producir de manera óptima recubrimientos comerciales Nitec 10224 y Metaceram 23075, sobre sustratos de fundición gris, variando la temperatura de depósito en el proceso de proyección térmica con llama.

Se caracterizaron los recubrimientos obtenidos mediante las diferentes técnicas propuestas y se evaluaron la adherencia y resistencia al desgaste.

Luego de analizar la morfología de las capas de Nitec (95%Ni) las cuales son compactas y con baja porosidad especialmente en N3, con estructura laminar deformadas y superpuestas unas sobre otras, así como la presencia de defectos propios de la técnica como los poros y las cavidades; se observa buena adherencia del recubrimiento al sustrato en la microscopía SEM.

Las capas de Metaceram (Ni 38%, WC 40%, Cr 12%) las cuales son compactas tienen alta porosidad (disminuye en M5 considerablemente), tienen buena adherencia del recubrimiento tanto en la microscopía SEM como en la óptica.

Se observan medidas muy similares de dureza lo que indica un cambio poco significativo en la dureza del material; también se aprecia que en el recubrimiento N3 el índice de desgaste fue menor que en los depositados en N4 y N5.

Se analizaron las zonas donde hay desgaste por esfuerzos cortantes y desgaste adhesivo mediante gráficas de pérdida de volumen contra dureza, concluyendo que el menor desgaste se observó en el depósito de N3 y M3.

Se analizó la rugosidad media de los ensayos para cada una de las temperaturas de deposición del sustrato y el valor más bajo en N3 y así mismo el desgaste abrasivo fue menor en estas también. Se observó un cambio significativo en el promedio del COF con un valor alto en N5 y bajo en N3, posiblemente debido a la porosidad observada en los recubrimientos de N5.

Finalmente al depositar los recubrimientos a 300°C de temperatura del sustrato para Nitec tendremos resultados óptimos de adherencia y resistencia mecánica que con respecto a temperaturas superiores según los resultados obtenidos. Mientras en el recubrimiento de Metaceram se observan algunas propiedades que mejoran (como la adherencia, homogeneidad del recubrimiento, espesor de capa) a temperaturas de 500°C, quizá esto es debido al alto punto de fusión del WC con respecto a los otros componentes del Metaceram como son Ni y Cr.

5.2 Recomendaciones

Rectificar las probetas antes de realizar cualquier tipo de ensayo, ya que podría generar datos erróneos en las pruebas de caracterización.

Proyectar recubrimientos no menores a 800 micrómetros de manera uniforme y rectificarlos a no menos de 300 micrómetros para evitar así la alta porosidad producida.

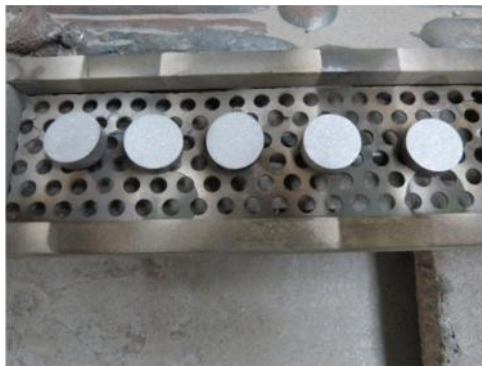
Se recomienda realizar más ensayos de desgaste para recubrimientos de Metaceram y similares variando la temperatura del sustrato para temperaturas altas (500°C a 1000°C). Para comparar los resultados obtenidos.

5.3 Glosario

1. **Mojado:** contacto a nivel atómico que se produce de forma espontánea cuando las superficies de dos cuerpos se ponen en contacto, generalmente con uno de los cuerpos en estado líquido.
2. **Coalescencia:** Propiedad o capacidad de ciertas sustancias y cosas para unirse o fundirse con otras en una sola.

A. Anexos:

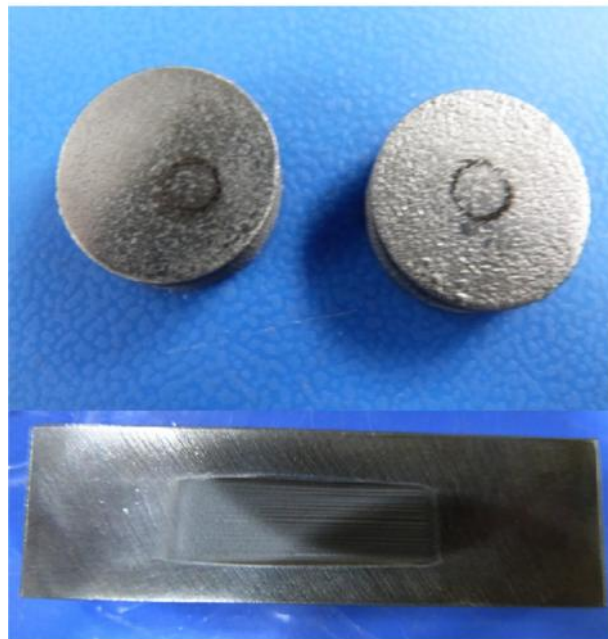
Proceso de proyección térmica y preparación de probetas



Problemas en la proyección térmica de las probetas



Probetas pruebas pin on disk y desgaste abrasivo



Tamizadoras usadas para la arena de la prueba de abrasión



Problemas en la recuperación de piezas de Cotecmar



Bibliografía

- [1] J. GALVELE y G. DUFFÓ , «Corrosión,» *Degradación de Materiales*, 2006.
- [2] J. B. S. E. Echeverri y F. Vargas, «Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono,» *Scientia et Technica*, vol. XIII, 2007.
- [3] MARTINEZ RAMIREZ, G. M. Resistencia a la corrosión de recubrimientos Nitec y Metaceram 23075 depositados mediante la técnica de proyección térmica por llama para la industria naval, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [4] A. International, «Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus,» *Designation: G65 – 04*, (Reapproved 2010).
- [5] L. DIMATÉ CASTELLANOS, «Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama,» *Tesis de Maestría*, 2011.
- [6] J. Lucena, «Análisis de falla de piezas de la industria naval que pueden ser recuperadas por técnicas de proyección térmica,» *Tesis de Pregrado*, 2008.
- [7] H. VELEZ SANCHEZ, «Recubrimientos de 560 As Producidos con el sistema de Proyección Térmica por Arco».
- [8] E. Castolin, «Nickel-Based alloy powder, recommended for cast irons,» *Eutalloy® NiTec 10224*.
- [9] E. Castolin, «Powders for Hot and Cold Spray Processes Metaceram 23075,» *Alloys for Use with CastoDyn® and TeroDyn® Thermal Spray Systems*, pp. 1-3.
- [10] J. MARULANDA, «Libro de proyección Térmica».
- [11] B. G. Nizamettin Kahraman, «ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR OF POWDER

FLAME SPRAYED COATINGS ON STEEL SUBSTRATES».

- [12] K. A. M. B. M. G. Kanchan Kumaria, «Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed».
- [13] Y.-B. W. S.-C. K. Y.-J. J. Min-Su HAN, «Effects of thickness of Al thermal spray coating for STS 304,» Junio 2008.
- [14] Rahul Premachandran Nair, The use of the pin-on-disk tribology test method to study three unique industrial applications.
- [15] DAVIS, J.R. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, 2004. 329 p. ISBN 0-87170-795-0.
- [16] EUTECTIC CORPORATION. Self bonding powders – Cold Process
- [17] Fang L., Zhou Q. An experimental simulation of cutting wear three body-abrasión. Departament of Science and Engineering, Harbin Institute of Tecnology.
- [18] JCPDS Card No. 01-087-0712.
- [19] JCPDS Card No. 00-051-0939.
- [20] Siegmann Stephan, Abert Christoph; 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop, Surface & Coatings Technology 220 (2013) 3–13.
- [21] HINCAPIE CAMPOS, William Steve. RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECUBRIMIENTOS COMERCIALES METACERAM 25050 Y PROXON 21071 PRODUCIDOS CON EL SISTEMA DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR LLAMA
- [22] R.M. Poorman, H.B. Sargent, y H. Lamprey Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes. US. Patent 2,714,563. Filed: 7 March 1952, granted 2 August 1955.
- [23] R.M. Gage, O.H. Nestor, y D.M. Yenni U.S. Patent 3,016,447, “Collimate d Electric Arc Powder Deposition Process”, 9 January 1962.
- [24] G.H. Smith, J.F. Pelton, and R.C. Eschenbach, Jet Plating of High Melting Point Materials, U.S. Patent, 2,861,900, 1958.
- [25] Diaz N., Siul J. Franco S., Adolfo A. Análisis comparativo de la resistencia al desgaste de piezas sinterizadas y piezas recubiertas por rociado térmico HVOF. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2002.
- [26] Thabo Thomas Sebeya, «An Investigation into the Causes of the Difference

in the Corrosion Behaviour of WC-Co and WC-VC-Co Hardmetals,»
Johannesbugo 2013.

[27] Engineering coatings: Design and application, S. Grainger, Ed., Abington Publishing, 1989, p 77.

[28] ASTM Standard C633 – Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings Reapproved 2008.

[29] Reyes, J. La Proyección Térmica una Excelente Alternativa para Mejorar Resistencia al Desgaste y a la Corrosión en Superficies. Universidad Nacional de Colombia.

[30] Marulanda, José Luddey. Rociado Térmico, Colombia, 2013, 136p.

[31] Castolin Eutectic, Coating Technology, Thermal Spray coating catalogue.

[32] García F., Palacios R., Serrano F., Diseño y construcción de un accesorio que se acople al maneral de oxicorte para termorociado de polvos. Universidad de El Salvador, Facultad del Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica.

[33] John D. Streeter P., Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus Aplicaciones.

[34] Richard Knight and Ronald W. Smith, Thermal Spray Forming of Materials Center for the Plasma Processing of Materials (CPPM), Drexel University, ASM Handbook Vol 7 Powder Metal Technologies and Applications pp. Philadelphia, PA . pp 958. 1998.

[35] Osaka Fuji Corporation. http://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/ (30 de Mayo de 2014).

[36] APPLICATIONS BULLETIN. Characterization of thermal spray coatings by instrumented indentation and scratch testing: Part I. CSM Instruments. No. 28. Abril 2009.

[37] L.C. Erickson, R. Westergfird, U Wiklund, N Axdn H.M. Hawthorne, S. Hogmark. "Cohesion in plasma sprayed coatings a comparison between evaluation methods". Wear. 214. 1998. p.p. 30-37.

[38] Burton A. Kushner and Edward R. Novinski, Perkin-Elmer Corporation, Metco Division Thermal Spray Coatings SM Friction, Lubrication, and Wear Technology Handbook, vol.18. United States of America. pp 1686, 1992

- [39] MORAN, García Itzel Deynny y RAMIREZ, Pérez David. Caracterización del proceso de rociado térmico de acero inoxidable sobre aceros de bajo contenido de carbono. Tesis para optar al título de Ingeniero mecánico. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. 2010. 129 p.
- [40] Evaluación del comportamiento a la fatiga y fatiga corrosión de una aleación comercial de aluminio recubierta por termo rociado vía HVOF, Universidad Central de Venezuela, 2003.
- [41] John D. Streeter P., Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones.
- [42] Jiri Nohava, Benedetta Bonferroni, Giovanni Bolelli, Luca Lusvarghi. Interesting aspects of indentation and scratch methods for characterization of thermally-sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2010. 1127 – 1131.
- [43] Streeter, J. D. (30 de Mayo de 2014). ives.edu. Obtenido de <http://www.ives.edu.mx/bibliodigital/Ingenierias/Libros%20Ingenieria/Facultad%20de%20Mecanica%202/MEC-22.pdf>
- [44] Castillo Hernandez, R. Ingeniería de superficies: Tecnologías y aplicaciones. Universidad Veracruzana. P. 123.
- [45] M. L. Thorpe, "Thermal Spray: Industry in Transition" *Adv.Mater. Process.*, 143 .1993. 50
- [46] Indura, grupo Air Products. http://www.indura.net/productos_detalle.asp?idq=4 (tomao el 25 de Marzo de 2014)
- [47] L.C. Erickson, R. Westergfird, U. Wiklund, N. Axdn, H.M. Hawthorne, S. Hogmark . Cohesion in plasma-sprayed coatings a comparison between evaluation methods. *Wear*. 1998. 30 – 37
- [48] Gedler y Paredes, Tesis de grado,UCV Evaluación del comportamiento a la fatiga y fatiga corrosión de una aleación comercial de aluminio recubierta por termorociado vía HVOF, Venezuela, 2001.
- [49] Norma ASTM C633-79
- [50] <http://es.scribd.com/doc/88872284/PRESENTACION-COMPUESTOS>, <http://es.scribd.com/doc/62832252/Metalizado>. (tomado el 27 de Abril de 2014)

- [51] Roma, Mantenimiento predictivo Ltda. <http://romapredictivo.com/servicios.html>, (tomado el 27 de Abril de 2014)
- [52] Victor, Cutting, heating and welding, 2009, pág. 173
- [53] Norma ASTM E384 for Knoop Hardness Testing.
- [54] Eutectic Castolin, Material safety data sheet for Eutalloy® Nitec 10224, 2009
- [55] Metalspray, tecnología al servicio de la industria <http://www.metalsprayperu.com/web/> (tomado el 5 de Marzo de 2014).
- [56] D. Iker Zuriguel Ballaz, Diseño de un silo cilíndrico para el almacenamiento de productos granulares, Universidad de Navarra, España, 2005.
- [57] Materiales y compuestos. Universidad de Navarra. <http://www.tecnun.es/asignaturas/Matcomp/Transparencias/Cap07.pdf> (tomado el 25 de Mayo de 2014)
- [58] Wordreference significado de la palabra coalescencia, <http://www.wordreference.com/definicion/coalescencia> (tomado el 4 de Marzo de 2014).
- [59] J. B. S. Grainger, "Engineering coatings: Design and application," vol. Ed. Abington Publishing. Segunda Edición, 1998. Pp 119-166.
- [60] P. Tafa, "Power Solutions Catalog," 2000.
- [61] S. Metco, "Thermal Spray Materials Guide," 2006.
- [62] EUTECTIC CASTOLYN. Technical Data Book
- [63] Peterson, M. B. "Wear Testing Objectives and Approaches," Selection and Use of Wear Tests for Metals, ASTM STP 615, R. G. Bayer, Ed., American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 3-11
- [64] Saltzman, G. A. "Wet-Sand Rubber-Wheel Abrasion Test for Thin Coatings," Selection and Use of Wear Tests for Coatings, ASTM STP 769, R. G. Bayer, Ed., American Society for Testing and Materials, 1982, pp. 71-91
- [65] C. CASSINA AND I. G. MACHADO. Low-Stress Sliding Abrasion Resistance of Cobalt-Based Surfacing Deposits Welded with Different Processes.
- [66] B. Viswanatha, S. Vijayarangan. A STUDY OF THE LOW STRESS SLIDING ABRASION WEAR BEHAVIOR OF MULLITE COATINGS.
- [67] Borik, F., "Rubber Wheel Abrasion Test," Paper 700687 presented at the SAE Farm, Construction and Industrial Machinery Meeting, Milwaukee, Sept.

1970.

[68] Burton A. et al. Thermal Spray Coatings. Handbook ASTM Vol 18. 1992. Friction, Lubrication, and Wear Technology. USA 2000 pp 1686.

[69] DIN 50320. Wear – Terms – Systems Analysis Of Wear Processes – Classification Of The Field of Wear. 1979

[70] Martínez, P.F. 1996. La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento, Limusa.

[71] D.K. Dwivedi, Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloy.

[72] PIRSOA, Jüri. VILJUS, Mart. Three-body abrasive wear of cermets.

[73] “Resistencia al desgaste por abrasión” (tomado el 28 de Mayo de 2014) <http://www.slideshare.net/erikromero23/desgaste-porabrasionenmateriales>

[74] Peter J. Blau, Oak Ridge. Introduction to adhesion, friction and Wear Testing Handbook ASTM Vol 8. Mechanical Testing and Evaluation. USA 2000 pp 694.

[75] Archard, J. F. “Contact and rubbing of flat surface” J. Appl. Phys. 24:981-988, (1953).

[76] R. Hernández, M.R. Cruz. Evaluación del comportamiento a desgaste en aceros de herramienta: simulación por ordenador y verificación experimental.

[77] Galarraga G., Michael X., González F., Fernando Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de recubrimientos tipo cermet depositados por HVOF.

[78] Azkeland. D, Ciencia e ingeniería de los materiales. Tercera edición.

[79] YUL CHO, Tong, HONG Jae Yoon, CHO Jae Young and others. Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr. Surface and Coatings Technology. P. 3250–3253. 2009.

[80] DEVIA, Narváz Diana Marcela. Mecanismos de desgaste en herramientas de conformado con recubrimientos de TiAlN por medio de sistemas papvd. Tesis para optar al título de Doctorado en Ingeniería-Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Facultad de Minas. 2012. 107 p

[81] F. Borik Testing for Abrasive Wear Selection and use of wear tests for metals

american society for testing and materials. New Orleans, La. 17-21 Nov. 1975. pp. 38.

[82] A.W. Ruff Wear "Measurement Friction, Lubrication, and Wear Technology" Handbook United States of America. ASM. Vol. 18. "Friction, Lubrication, and Wear Technology" 1992. p.p. 687 -702.

[83] Raymond Bayer. Mechanical wear prediction and prevention. New York, N.J

[84] S. Sampath, et al., Materials Science and Engineering 364, 2003. 216

EEUU: M Dekker 1994.pp. 209.

[85] G.J. Gore, J.D. Gates "Effect of hardness on three very different forms of wear". Wear. 203-204. 1997. 1544-563

[86] I.M Hutchings. Tribology International 31 (1998) 5-15

[87] A.W. Ruff Wear "Measurement Friction, Lubrication, and Wear Technology" Handbook United States of America. ASM. Vol. 18. "Friction, Lubrication, and Wear Technology" 1992. p.p. 687 -702

[88] Development and use of ASTM standards for wear testing Blau P., Kenneth G. Budinski. Wear 225–229 _1999. pp. 1159–1170

[89] M.G. Gee. A. Gant. I. Hutchings. R. Bethke. K. Schiffman. K. Van Acker. S. Poulat. Y. Gachon. J. von Stebut. "Progress towards standardisation of ball cratering" Wear. 255. 2003. 44-54

[90] Suarez F. Velez J. "ESTUDIO DEL MODELO DE DESGASTE PROPUESTO POR ARCHARD" Dyna rev.fac.nac.minas [online]. 2005, vol.72, n.146, pp. 27-43

[91] ASTM G99 – 05. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. United State. 2005

[92] JIMENEZ, Forero Hernando. Mejoramiento de la vida útil de moldes para la producción de rines utilizados por la empresa Madeal S.A. mediante el recubrimiento con películas delgadas producidas por la técnica de pvd. Tesis para optar al título de Magister en Física. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 2009. 100 p.

[93] ARDILA, Rodriguez Laura Angélica. Resistencia al desgaste de recubrimientos Bi/NbC producidos con el sistema sputtering con magnetron desbalanceado. Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Facultad de Ingeniería.

- Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. 2013. 188 p
- [94] G. Marot. J. Lesage Démarécaux. M. Hadad. St. Siegmann. M.H. Staia. "Interfacial indentation and shear tests to determine the adhesion of thermal spray coatings". *Surface & Coatings Technology*. 201. 2006. p p. 2080–2085
- [95] García Costales F. Recubrimientos de proyección por plasma. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo.
- [96] S.J. Bull, E.G. Berasetegui "An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing" *Tribology International* 39. 2006. p p. 99 –114
- [97] K. L. Mittal, *Adhesion Measurement of Films & Coatings: Volume 2*. VSP, 2001
- [98] Sierra, Vega Juan David (2003). Cohesión. (tomado el 25 de Mayo de 2014) <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/conceptosbasicosmfluidos/cohesi%C3%B3n/cohesi%C3%B3n.htm>
- [99] ASTM E384 – Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials March 2012
- [100] ASTM C633-79 Standard Method of Test for Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings, ASTM International, 1979, 5 p.
- [101] Ghabchi A., Sampath S. Damage mechanisms and cracking behavior of thermal sprayed WC–CoCr coating under scratch testing. Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, Finland. 2014.
- [102] Norma ASTM C1624–05 Standard Test Method for Knoop Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing 2010.
- [103] Norma DIN EN 1071-3 Methods of test for Ceramic Coatings Par 3 determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test 2005.
- [104] APPLICATIONS BULLETIN. Characterization of thermal spray coatings by instrumented indentation and scratch testing: Part I. CSM Instruments. No. 28. Abril 2009.
- [105] Venci A., Arostegui S. Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the

- thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections. Mechanical Engineering Faculty, University of Kragujevac. 2011.
- [106] ISO/WD 27307 Evaluation of adhesion/cohesion of plasma sprayed ceramic coatings by scratch testing.
- [107] E. Lopez, F. Beltzung. G. Zambelli. "Measurement of cohesion and adhesion strengths in alumina coatings produced by plasma spraying". Journal of Materials Science. Letters. Vol. 8. p.p. 346-348.
- [108] Tabor, D. The Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, 1951.
- [109] Tecnimetales. <http://www.tecnimetales.com/durometro%20rockwell.htm> (tomado el 29 de Mayo de 2014).
- [110] Handbook of analytical methods for materials. Microindentation hardness testing. <http://mee-inc.com/microhar.html>. (tomado el 28 de Mayo de 2014).
- [111] Abella Jose M., Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones. Universidad politécnica de Cataluña. Madrid 2003.
- [112] El Tamiz, Biografía William Laurence Bragg (tomado el 31 de Mayo de 2014). <http://eltamiz.com/2013/09/04/premios-nobel-fisica-1915-william-henry-bragg-y-william-lawrence-bragg/>
- [113] Arias, D.F. Produccion y Caracterizacion de Recubrimientos de Multicapas de TiN/ZrN Por PAPVD por Arco Pulsado. Universidad Nacional de Colombia.
- [114] Rafael Toledo Bell. Teoría de FRX Familiarizándose con los principios. Neta ingeniería LTDA. Molibdenos y Metal S.A. 2012
- [115] Asociación Brasileira de tratamientos de superficies. Acabados superficiales. Metodos no destructivos utilizados para medir el espesor de capa de revestimientos. (tomado el 25 de Mayo de 2014) http://www.abts.org.br/boletim/newsletter/2012/espanol/mar/boletim_as_6_mat1.html.
- [116] J. A. Martin Gago Jose M Albella. Laminas Delgadas y recubrimientos, reparación, propiedades y aplicaciones. La Microscopia Para el Estudio de Materiales y Láminas Delgadas. Consejo superior de investigaciones científicas Madrid 2003.
- [117] Miguel Ipohorski Procesamiento de materiales por plasma. Técnicas de Microscopía Electrónica. Comisión Nacional de Energía Atómica. Gerencia CAC

Departamento de Materiales Buenos Aires 2000

[118] James F.Shackelford. "Introduccion a la ciencia de materiales para ingenieros" PEARSON 6^a edt. 2005. Madrid. 203 -207.

[119] Universidad Javeriana, Facultad de ciencias, neurobioquímica. Microscopía electrónica. (Tomado el 31 de Mayo de 2014.)
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/celular/microelectrans.htm>.

[120] My Scope. Training for advanced search. (tomado el 23 de Abril de 2014)
<http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/background/#detail>.

[121] Secretaría de energía. Instituto Mexicano del petróleo. (tomado el 1 de Abril de 2014). <http://www.imp.mx/comunicacion/gaceta/?imp=nota¬a=100610-2dfr>.

[122] Montgomery R., Sauerwein J. Materials catalog. National institute Of Santdards and Technology.

[123]Factor M., Roman I. Microhardness as a simple means of estimate relative wear resistance of carbide Thermal Spray Coatings.

[124] Y. Wang, M. Yan. The effect of CeO₂ on the erosion and abrasive wear of termal sprayed FeAl intermetallic alloy coatings.

[125] J.K.N. Murthy, B. Venkataraman. Abrasive wear behaviour of WC–CoCr and Cr₃C₂–20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes.

[126] Nuria Cinca, Carlos Roberto, Camello Lima Jose Maria. An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings.

[127] Yamaguchi M, Inui H, Ito K. High temperature structural intermetallics. Acta Mater. 2000;48:307-22.

[128] Vasudevan AK, Petrovic JJ. A comparative overview of molybdenum disilicide composites. Mater Sci Eng A. 1992; 155:1-17

[129] CSM Instruments. Advanced Mechanical Surface Testing. Characterization of thermal spray coatings by instrumented indentation and scratch testing: Part I.

[130] J.G. La Barbera-Sosa. Y.Y. Santana, C. Villalobos-Gutiérrez, S. Cabello-Sequera, M.H. Staia, E.S. Puchi-Cabrera. Effect of spray distance on the corrosion-fatigue behavior of a medium-carbon steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray.

[131] Nejat Y. Sari. Muharrem Yilmaz. Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr–Ni–B–Si+WC thermal spraying powders.

[132] Cotecmar, ciencia y tecnología. <http://www.cotecmar.com/ciencia-y-tecnologia.html>