

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE TRES RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR TERMOROCIADO POR ARCO ELÉCTRICO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Arellana S., Samuel D.

Ferreira D., Ramiro J.

Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Mayo 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE TRES RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR TERMOROCIADO POR ARCO ELÉCTRICO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Pedro Cadenas.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Arellana S., Samuel D.

Ferreira D., Ramiro J.

Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Mayo 2014



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

Samuel Arellana y Ramiro Ferreira

Titulado

*“Evaluación de la Resistencia al Desgaste por
Abrasión de Tres Recubrimientos Aplicados
Termorociado por Arco Eléctrico”*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los 05 días del mes de Junio del año dos mil catorce.

Prof. Andrea Scagni
Jurado



Prof. Pedro Cadenas
Tutor

Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Caracas, 05 de junio de 2014

Prof. Gerardo Ramírez
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería-UCV
Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

Samuel Arellana C.I. 18.467.144

y

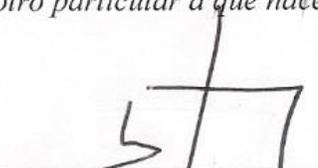
Ramiro Ferreira C.I. 18.315.544

MENCIÓN TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado, titulado

*“Evaluación de la Resistencia al Desgaste por
Abrasión de Tres Recubrimientos Aplicados
Termorociado por Arco eléctrico”*

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.


Prof. Andrea Scagni
Jurado





Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. Pedro Cadenas
Tutor

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres, de los cuales me siento profundamente orgulloso, y con
los cuales siempre he podido contar.

A mis hermanos, Liliana, Sonia y Jesús, y mi cuñado Ricardo que
siempre han estado ahí dándome apoyo y afecto.

A mis sobrinos, Valeria, Camila y Ricardito, y a todo el resto de mi
familia.

A la Universidad Central de Venezuela, la casa que me formó como ingeniero
mecánico.

Samuel D. Arellana S.

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo y los principios que me infundieron.

A mis hermanas por su apoyo y alegría que me han brindado.

A mi hermanito por hacerme igualmente reír.

A mi sobrinita hermosa y risueña.

Al resto de mi familia, abuelas, tías, tíos que estuvieron pendiente de la
realización de esta meta en mi vida.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarme sus conocimientos y
hacerme una mejor persona.

Ramiro J. Ferreira D'Ambrosio

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarnos la oportunidad de formarnos profesional y académicamente.

A nuestro tutor el Dr. en Ingeniería Mecánica Pedro Cadenas por sus enseñanzas, constante apoyo e incondicional ayuda.

Al Prof. Andrea Scagni quien siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y nos brindó su apoyo y enseñanzas.

A todo el personal de Plasmatec Ingenieros por su colaboración en la realización de los recubrimientos y demás.

A la Prof. María de los Ángeles Rodríguez de Prato por su enseñanza y ayuda.

Al Prof. Crisanto Villalobos y a los preparadores del Laboratorio de Metalografía que siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos.

Al Taller de precisión JV y en especial al Ing. Joaquín Pereira por su ayuda y prestación de servicios.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, por el uso de los equipos y la ayuda prestada de su personal, en especial a Gustavo Gutierrez y técnicos del galpón.

A la TSU Oneida Gutiérrez y la TSU Hamyit Blanco por la ayuda brindada en lo referente a los trámites ante los departamentos y escuela.

AGRADECIMIENTOS

A Denis Riera que labora en Control de Estudios y fue nuestra guía ideal en todo lo concerniente a los procesos de inscripción y demás.

A la secretaria del Departamento de Diseño Rosa Aquino por su ayuda en las formalidades relativo a la tesis y orientación.

A la Lic. Marisela Segura, encargada de la biblioteca de la Escuela de Ingeniería Mecánica, quien nos ayudó siempre amablemente.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV por su colaboración en la realización de la microscopía Electrónica de Barrido (MEB) así como también a la Ing. Gelin Mejias y a Franklin Rico que laboran allí.

A la Ing. Maribel Suárez por su colaboración en el uso de los Laboratorios de Metalurgia y que también nos ayudó y apoyo.

Al Ingeniero José Gregorio La Barbera, por su amable ayuda con nuestras dudas.

A las Licenciadas María Ferreira y Hortencia Moreno por su colaboración en correcciones de estructura y redacción.

A nuestros amigos y compañeros más cercanos de la Escuela de Ingeniería Mecánica que hicieron de este camino más llevadero y amigable.

A nuestras familias por apoyarnos en todo el transcurso de nuestra carrera.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron con la realización de este trabajo.

Arellana S., Samuel D. y Ferreira D., Ramiro J.
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR
ABRASIÓN DE TRES RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR
TERMOROCIADO POR ARCO ELÉCTRICO.

Tutor Académico: Dr. en Ingeniería Mecánica Pedro Cadenas.

Tutor Industrial: Ing. Andrea Scagni.

Tesis. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Mecánica. Año 2014, PP. 149.

Palabras Claves: Desgaste, Abrasión, Recubrimiento, Rociado Térmico, Arco Eléctrico, Alpha Plus, Metco 8222, Acero 420.

Resumen. En el presente trabajo se estudió y comparó la resistencia a la abrasión de tres recubrimientos: Alpha plus, Alpha Plus + Acero 420 y Metco 8222 + Acero 420, depositados mediante la técnica de rociado térmico por arco eléctrico, sobre un sustrato de acero AISI 1018. Se evaluó el desgaste abrasivo mediante el ensayo establecido por la norma ASTM G-65, procedimiento B. Adicionalmente se ensayó con otros dos niveles de carga distintos con el fin de evaluar el comportamiento de la resistencia de los recubrimientos al variar la carga aplicada en los ensayos de abrasión. La macroestructura y los mecanismos de desgaste fueron analizados a través de la microscopía electrónica de barrido (SEM), y la composición química mediante la espectroscopia de rayos X (EDS). Los resultados arrojaron que el recubrimiento Alpha Plus es el más resistente a la abrasión de todos los estudiados, en las tres condiciones de carga. Ya que fue 1,38 veces superior al Alpha plus + 420 y 3,80 veces mejor que el Metco 8222 + 420. Los mecanismos principales de desgaste que actuaron durante la abrasión fueron el microagrietamiento para el Alpha Plus, y para el Alpha Plus + Acero 420 y Metco 8222 + Acero 420 el surcado y microagrietamiento. Para este estudio se demostró la proporcionalidad entre carga y desgaste abrasivo y la relación entre dureza y resistencia a la abrasión.

Arellana S., Samuel D. y Ferreira D., Ramiro J.
EVALUATION OF ABRASION RESISTANCE OF THREE
COATINGS APPLIED BY THERMAL SPRAY TWIN ARC.

Academic Tutor: Dr. Mechanical Engineer Pedro Cadenas.

Industrial Tutor: Engineer Andrea Scagni.

Tesis. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Mecánica. Año 2014, PP. 149.

Key Words: Wear, Abrasion, Coating, Thermal Spray, Twin Arc, Alpha Plus, Metco 8222, Steel 420.

Abstract. In this research was studied and compared the abrasion resistance of three coatings: Alpha Plus, Alpha Plus + Steel 420 y Metco 8222 + Steel 420, applied by thermal arc spray, on a steel AISI 1018. It was evaluated abrasive wear through test ASTM- 65, procedure B. Additionally, tests were made with another two load levels for the purpose of evaluate the behavior of the coatings resistance when vary the load applied on the abrasion tests. The coating structure and abrasive wear mechanisms were analyzed through scanning electron microscopy (SEM) and chemistry composition by energy dispersive X ray spectroscopy (EDX). The results showed that Alpha Plus is the most resistant against abrasion among coatings studied, in all load conditions. Because Alpha Plus was 1, 38 times better than Alpha plus + 420 and 3, 80 times better than coating Metco 8222 + 420. The main abrasive wear mechanics were micro-fracture to Alpha Plus and to Alpha Plus + Steel 420 and Metco 8222 + Steel 420 micro-ploughing y micro-fracture. In this study was observed the proportionality between load and abrasive wear and the relation between hardness y abrasion resistance.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ÍNDICE DE CONTENIDO	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
CAPITULO I	1
1. FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Antecedentes.....	4
1.3. Objetivos.....	8
1.3.1. Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	9
CAPITULO II.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Tribología.....	11
2.1.1. Fundamentos de la tribología.....	11
2.1.2. Fricción.....	12
2.1.3. Desgaste.....	13
2.1.4. Tipos de desgaste.....	14
2.2. Fenómeno de Abrasión.....	22
2.2.1. Definición de abrasión.....	22
2.2.2. Física-Química del desgaste abrasivo.....	24
2.2.3. Tipos de desgaste abrasivo.....	28
2.2.4. Mecanismos de desgaste abrasivo.....	33
2.2.5. Variables que intervienen en el desgaste abrasivo.....	36
2.3. Rociado térmico.....	39

2.3.1. Definición.....	39
2.3.2. Ventajas.....	41
2.4. Recubrimientos.	41
2.4.1. Porosidad.....	42
2.4.2. Adherencia al sustrato.	44
2.4.3. Cohesión de las partículas depositadas.	45
2.5. Tipos de deposición.....	45
2.5.1. Rociado térmico por Combustión.	45
2.5.2. Rociado térmico por Plasma (Air Plasma Spray).	48
2.5.3. Rociado térmico por arco eléctrico (Twin Wire Arc Spray).....	49
CAPITULO III.....	56
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	57
3.1. Investigación.	57
3.1.1. Investigación Documental.....	57
3.1.2. Investigación Experimental.....	57
3.2. Procedimientos y Actividades.....	59
3.2.1. Investigación bibliográfica.....	59
3.2.2. Aprendizaje para el uso de la máquina de abrasión.	59
3.2.3. Adquisición de las pletinas de acero AISI1018.	59
3.2.4. Mecanizado de las probetas según la normas ASTM G-65.	59
3.2.5. Aplicación de los distintos recubrimientos sobre las probetas...60	
3.2.6. Obtener los repuestos o materiales necesarios para ensayos.	60
3.2.7. Verificar el estado de la máquina de abrasión y su calibración. 60	
3.2.8. Realizar los ensayos de dureza Vickers.	60
3.2.9. Ejecución de los ensayos de abrasión.	61
3.2.10. Realizar cortes transversales de las probetas.	61
3.2.11. Determinar la densidad de los tres recubrimientos.	61
3.2.12. Realización de Microscopía Electrónica de Barrido.	62
3.2.13. Tabulación, gráficas y organización de datos y resultados. ...	62
3.2.14. Análisis de Resultados y elaboración de conclusiones.	62

3.3.	Diseño experimental aplicado.	62
3.4.	Material de las muestras.	65
3.4.1.	Material Base o Sustrato.	65
3.4.2.	Recubrimiento.	65
3.5.	Procesos.	67
3.5.1.	Fabricación de Probetas.	67
3.5.2.	Preparación de la superficie antes del proceso del rociado.	68
3.5.3.	Proceso de Rociado Térmico por Arco Eléctrico.	69
3.5.4.	Rectificado.	71
3.6.	Ensayo de abrasión.	71
3.6.1.	Máquina de ensayos de abrasión.	71
3.6.2.	Limpiador por Ultrasonido.	72
3.6.3.	Balanza.	73
3.6.4.	Abrasivo.	74
3.6.5.	Rueda de caucho.	74
3.6.6.	Procedimiento General.	75
3.6.7.	Pérdida Volumétrica.	76
3.7.	Ensayo de Dureza por Microindentación.	77
3.8.	Calculo de la densidad.	80
3.9.	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).	81
CAPITULO IV		83
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	84
4.1.	Macroestructura y composición química elemental.	84
4.1.1.	Alpha Plus.	84
4.1.2.	Alpha Plus + Acero Inoxidable 420.	89
4.1.3.	Metco 8222 + 420.	93
4.2.	Determinación de la densidad.	98
4.3.	Análisis del Ensayo de Microdureza.	99
4.4.	Análisis del ensayo de Abrasión.	103
4.5.	Microscopía electrónica de barrido.	109

CAPITULO V.....	114
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
5.1. Conclusiones.	115
5.2. Recomendaciones.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	123
ANEXOS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Desgaste Adhesivo.....	16
Figura 2.2 Desgaste Micro-oscilatorio (“Fretting”).	20
Figura 2.3 Desgaste por Erosión.	21
Figura 2.4 Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.	26
Figura 2.5 Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión.	27
Figura 2.6 (a) Desgaste abrasivo entre dos cuerpos. (b) Desgaste abrasivo entre tres cuerpos.	29
Figura 2.7 Abrasión de bajo esfuerzo.	30
Figura 2.8 Abrasión de alto esfuerzo.	31
Figura 2.9 Abrasión por desgarramiento.....	32
Figura 2.10 Desgaste abrasivo con impacto.....	32
Figura 2.11 Microarado.....	34
Figura 2.12 Microcorte.....	35
Figura 2.13 Microagrietamiento.	36
Figura 2.14 Microfatiga.	36
Figura 2.15 Morfología típica de un recubrimiento por rociado térmico.	40
Figura 2.16 Esquema de la morfología de un recubrimiento cerámico Y-PSZ fabricado por proyección térmica.	43
Figura 2.17 Rociado térmico por llama subsónico.....	46
Figura 2.18 Rociado térmico por llama supersónico.	47
Figura 2.19 Rociado térmico por Llama Hipersónico.....	48
Figura 2.20 Rociado térmico por plasma.	49
Figura 2.21 Esquema del proceso de rociado térmico por arco eléctrico.	50
Figura 2.22 Componentes del sistema de rociado térmico por arco eléctrico. ..	53
Figura 3.1 Probetas montadas en la base.	68
Figura 3.2 Proceso de Rociado Térmico.	70
Figura 3.3 Máquina de Ensayo de Abrasión.	72
Figura 3.4 Limpiador electrónico por ultrasonido.	73

Figura 3.5 Balanza Ainsworth AA160 con apreciación de 0.0001 g.....	74
Figura 3.6 Cortadora Metalográfica.....	77
Figura 3.7 Pulidora.....	77
Figura 3.8 Microdurómetro.....	78
Figura 3.9 Microscopio Electrónico de Barrido.....	81
Figura 4.1 Sección Transversal. Alpha-Plus a 100x.	85
Figura 4.2 Sección Transversal. Alpha-Plus a 500x.	86
Figura 4.3 Sección Transversal probeta con Alpha Plus a 500x.....	86
Figura 4.4 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Alpha Plus.	89
Figura 4.5 Sección Transversal Alpha Plus+420 a 100x.	90
Figura 4.6 Sección Transversal Alpha Plus+420 a 500x	90
Figura 4.7 Sección Transversal. Alpha-Plus a 100x.	91
Figura 4.8 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Alpha Plus + 420 a 100x.....	92
Figura 4.9 Sección Transversal. Metco 8222 + 420. (fotografía superior a 100x) a) Detalle Porosidad a 1500x. b) Análisis Químico de partícula no fundida. c) Análisis Químico de partícula de óxido.....	94
Figura 4.10 Sección Transversal. Metco 8222 + 420 a 100x.....	95
Figura 4.11 Sección Transversal Metco 8222 + 420 a 500x.....	96
Figura 4.12 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Metco 8222 Plus + 420 a 20x.....	98
Figura 4.13 Densidad de los recubrimientos.....	99
Figura 4.14 Dureza en la sección transversal de las probetas.	100
Figura 4.15 Dureza en la superficie de las probetas.....	101
Figura 4.16 Comparación de dureza transversal de distintos recubrimientos..	102
Figura 4.17 Comparación de pérdida volumétrica en las tres cargas.....	105
Figura 4.18 Comparación de la resistencia a la abrasión de distintos recubrimientos, ASTM G 65-B.....	108

Figura 4.19 Probeta Alpha Plus. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella de desgaste a 500 X.	109
Figura 4.20 Alpha Plus + 420. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella de desgaste a 500 X.	110
Figura 4.21 Metco 8222+420. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella de desgaste a 500 X.	111
Figura 4.22 Comparación de las tres huellas de desgaste. Centro de la huella de desgaste a 500x. a) Alpha Plus, b) Alpha Plus + 420, c) Metco 8222 + 420.	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de desgaste en la industria.	15
Tabla 3.1 Parámetros de la Prueba según la Norma ASTM G-65.	63
Tabla 3.2 Distribución de probetas según material y carga.	64
Tabla 3.3 Composición química nominal Alpha Plus.	66
Tabla 3.4 Composición química nominal Acero Inoxidable 420.	66
Tabla 3.5 Composición química nominal Metco 8222.	67
Tabla 3.6 Cantidad de probetas según material.	69
Tabla 3.7 Parámetros del termorociado por arco eléctrico.	70
Tabla 3.8 Composición del Recubrimiento de Goma.	75
Tabla 4.1 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico. Alpha Plus.	87
Tabla 4.2 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico. Alpha Plus + 420.	92
Tabla 4.3 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico. Metco 8222 + 420.	97
Tabla 4.4. Densidad de los recubrimientos.	98
Tabla 4.5 Comparación de la dureza en la sección transversal.	100
Tabla 4.6 Comparación de la dureza superficial.	101
Tabla 4.7 Resultados de Ensayo Abrasión, Carga: 30,35 N.	103
Tabla 4.8 Resultados Ensayo Abrasión, Carga: 101,55 N.	103
Tabla 4.9 Resultados de Ensayo Abrasión bajo Norma G-65 B, Carga: 130 N.	103
Tabla 4.10 Comparación pérdida volumétrica a 31.35 N.	106
Tabla 4.11 Comparación pérdida volumétrica a 101.55 N.	107
Tabla 4.12 Comparación pérdida volumétrica a 130 N.	107

INTRODUCCIÓN

El fenómeno del desgaste por abrasión se presenta en gran cantidad de elementos de máquinas en las industrias y por lo general es una de las principales causas de reemplazo de estas piezas.

Un ejemplo clásico de desgaste por abrasión se presenta en las carcasas de las bombas de tornillo petroleras. La arena presente en la mezcla bombeada y en el líquido que recircula internamente en la bomba, actúa como agente abrasivo responsable del desgaste de las carcasas, incrementando con el tiempo la holgura y la cantidad de fluido que recircula entre tornillos y carcasa. Esto trae como consecuencia la disminución en la producción, ocasionando bajas considerables en los ingresos por producción para la empresa.

Si se aplicara el uso de un recubrimiento depositado por un proceso de rociado térmico en las piezas en vez de sustituirlo completamente, se podrían recuperar las mismas aumentando así la vida útil de la pieza sin tener que reemplazarla. Con el recubrimiento también se lograría aumentar la resistencia al desgaste abrasivo, disminuyendo así los problemas de desgaste que ocurren normalmente. Este hecho influye directamente en los costos del proceso de producción y estimula la productividad de las empresas.

El Rociado Térmico combina la energía térmica para el calentamiento y fusión de materiales metálicos o no metálicos con la energía cinética para la proyección y dispersión de las gotas sobre un sustrato previamente preparado (Herbert et al. 1.997; Hower Jr., 1.994).

Los procesos de termorociado pueden ser por arco eléctrico, plasma o combustible gaseoso, con el fin de generar el calor necesario para formar un

rociado del material de deposición fundido compuesto por gotas entre 0.5 y 100 μm de diámetro, y luego ser transferido al sustrato.

Ahora bien, entre las técnicas de aplicación más importantes, se encuentran las que utilizan electricidad como fuente de energía (Arco Eléctrico, Plasma) y las que utilizan combustión (HVOF, Llama, D-Gun).

Cabe resaltar que, el termorociado por arco eléctrico no es uno de los métodos de aplicación más modernos y tiene como desventaja que la proyección de las partículas no es a velocidad supersónica (como en HVOF) perdiendo así la mejor cohesión entre ellas y generando mayor porosidad. Pero entre sus ventajas podemos mencionar que puede alcanzar mayores espesores de recubrimiento y menor distancia de rociado que HVOF, esto último es importante para aplicaciones como en las carcasas de bombas o cojinetes y anillos de diámetros que no cumplen con las dimensiones mínimas para aplicación de HVOF. También es uno de los métodos más económicos de termorociado.

Se compararán tres recubrimientos aplicados por termorociado por arco eléctrico para reponer el material perdido por abrasión, enfocando así el sentido de este proyecto a la recuperación de elementos de máquina donde otros métodos de aplicación de recubrimiento, como HVOF, no pueden ser utilizados.

Por tal motivo, esta investigación pretende dar a conocer las diferencias, ventajas, desventajas y propiedades finales de los recubrimientos ensayados así como una conclusión comparativa de los mismos, todo ello realizado con la finalidad de mejorar en lo posible la resistencia al desgaste por abrasión en los elementos de máquinas, extendiendo así su vida útil y minimizar los tiempos y ciclos de reparación en la industria.

CAPITULO I

1. FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. Planteamiento del problema.

El desgaste por abrasión es muy común en una gran cantidad y variedad de operaciones. Este hecho provoca elevados gastos anuales para las industrias al tener que sustituir las piezas. Asimismo, los fenómenos de desgaste son conocidos por afectar negativamente la actividad industrial en dos aspectos: rentabilidad y productividad. El desgaste es inevitable siempre que existan partículas o cuerpos en continuo contacto y con movimiento relativo entre sí, lo que produce deformación y pérdida sobre el material de las piezas involucradas. También el desgaste por abrasión tiene un alto impacto en la vida útil de la pieza y es considerado responsable por el 50 % de las fallas por desgaste en general. Por ser tan común, se estima que el costo de las reparaciones por abrasión representa de 1 a 4% del producto bruto nacional de un país industrializado.

Cuando los elementos de máquinas se desgastan y operan con dimensiones que no son las originales, los procesos no son los más ideales y disminuye la eficiencia. Esto trae como consecuencia la disminución en la producción, ocasionando bajas considerables en los ingresos por producción para la compañía. También hay que considerar que los costes por reparación generalmente son más económicos que los costos por reposición original de la pieza, además hay que tomar en cuenta que en el caso de Venezuela muchos de estos repuestos son importados y se hace difícil su obtención o que suelen demorar mucho tiempo en llegar.

Los elementos de máquina originales en muchas ocasiones suelen ser bastante propensos al desgaste por abrasión ya que carecen de recubrimiento o el material base no es el más adecuado para resistir este tipo de deterioro. Del mismo modo, las industrias se ven perjudicadas cuando los procesos que realizan

deben detenerse para efectuar reparaciones en sus distintos equipos y piezas afectadas por el desgaste abrasivo.

Como ejemplo particular se puede citar a Venezuela, país altamente dependiente de la industria petrolera, donde cada percance ocasionado por las fallas de este tipo en las bombas utilizadas en la extracción petrolera provoca que la economía se vea afectada por retrasos en la producción.

Ahora bien, la técnica de rociado térmico por proyección de alta velocidad (HVOF - High Velocity Oxygen Fuel) es una de las más implementadas hoy en día para la recuperación por desgaste. Pero son costosas, el espesor obtenido es menor en comparación con el termorociado por arco eléctrico y para algunas aplicaciones no es posible aplicarlas debido a que requieren de una distancia de rociado mínima que de no cumplirse afecta tanto la dureza del recubrimiento como la integridad de las capas que lo forman y su adherencia. Esto se debe a que las partículas con poco tiempo de exposición en la llama no se funden en su totalidad y golpean el sustrato a altas velocidades lo que conlleva a un sobrecalentamiento del sustrato por la cercanía ocasionando una potencial reacción de oxidación (Guzmán & Pardi, 2011).

De igual forma, los recubrimientos existentes en el mercado para la recuperación de las piezas son muy variados y entre sus métodos de aplicación existen muchos procesos posibles y esto dificulta la elección del más adecuado para algún caso en particular.

1.2. Antecedentes.

Dallaire, S. (2000) realizó una investigación en el cual parte de su trabajo consistió en realizar ensayos de abrasión sobre un recubrimiento base hierro-Boro (Fe_2B) conocido comercialmente como Alpha-1800 depositado por termorociado por arco eléctrico, para determinar su resistencia ante éste fenómeno de desgaste. El ensayo de abrasión se rigió por las normas ASTM G65-B. Los resultados demostraron que la pérdida de volumen debido a la abrasión del Alpha 1800 es 10 veces menor que la de otros recubrimientos (aplicados por arco eléctrico) comparados que se solían usar en mayor parte por la industria en la época.

Los autores Cermeño, J. y Ruiz, J. (2006) estudiaron la resistencia al desgaste de un recubrimiento base hierro, conocido comercialmente como Alpha-1800, depositado por el proceso de rociado térmico por arco eléctrico sobre un acero AISI 1020. La evaluación del recubrimiento frente al desgaste se realizó mediante ensayos abrasión. El ensayo de abrasión se realizó bajo la norma ASTM G65-00 utilizando tiempos de 30 segundos, 1, 5, 10 y 15 minutos. Los resultados mostraron que el Alpha 1800 es 2,4 veces más resistente a la erosión y 6,6 veces más resistente a la abrasión que el Acero AISI 1020.

Es importante resaltar que, aun hoy en día, son muy pocos los trabajos e informaciones que se encuentran disponibles referente a recubrimientos depositados por arco eléctrico ya que es algo relativamente nuevo en el mercado y las industrias son muy reservadas con la manipulación de las tecnologías que manejan. Por esto, es necesaria la mención de otros trabajos similares, incluyendo otras técnicas de deposición, en donde se realizaron igualmente ensayos de abrasión a un grupo de probetas, para así luego comparar diferentes técnicas y resultados con este trabajo. Entre ellos se nombraran los proyectos que hablan de

deposición de recubrimiento por medio de HVOF o por Plasma de Arco Transferido.

Igualmente, en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), gran parte de los trabajos relacionados con los recubrimientos y su resistencia a la abrasión son realizados con el apoyo de la empresa Plasmatec Ingenieros, C.A. (responsables de la deposición de los mismos recubrimientos) ya que son una empresa dedicada a la recuperación de piezas y partes mecánicas de bombas y otras máquinas de la industria petrolera. Entonces, en vista de que en Plasmatec están interesados en ver las comparaciones que ocurre cuando se aplican diferentes recubrimientos y con diferentes métodos de deposición entonces se tomara la oportunidad para desarrollar en este trabajo comparaciones con otras tesis afines de las que puede beneficiarse Plasmatec.

Por ello se cita a Bilbao, C. y Moreno, I. (2002), quienes realizaron un estudio del comportamiento frente al desgaste abrasivo de recubrimientos tipo cermet (cerámico-metálico) depositados por el proceso de rociado térmico oxígeno-combustible conocido por las siglas HVOF. Para este fin se utilizaron tres aleaciones distintas como material de alimentación, la primera de ellas fue una mezcla formada por 70% (WC-12%Co) y 30% de una aleación base Níquel comercialmente conocida como Colmonoy 88, la segunda fue una mezcla de 50% (WC-12%Co) y 50% Colmonoy 88 y la tercera fue 100% Colmonoy 88. Luego de realizar todos los ensayos se pudo determinar que el tratamiento térmico con llama oxiacetilénica mejoró las propiedades de los recubrimientos logrando su densificación, además se determinó que el recubrimiento que obtuvo mejor resistencia a la abrasión fue el de 70% (WC-12%Co) y 30% Colmonoy 88 tratado térmicamente, el cual obtuvo una resistencia a la abrasión 57 veces mayor que el acero base (Acero 1020) para el ensayo de 5 minutos, 74 veces para el ensayo de 10 minutos y 58 veces para el ensayo de 30 minutos.

Asimismo, Burgos, H. (2002) para su tesis de grado presentó el estudio y análisis de la resistencia a la abrasión de los recubrimientos de Babbitt. Estos son muy utilizados en la industria para la fabricación y reparación de cojinetes de deslizamiento, ya que este material proporciona una baja fricción cuando dos metales se encuentran en contacto íntimo. En este trabajo se estudió la influencia de los parámetros de operación tales como, amperaje y presión de atomización, sobre la resistencia al desgaste por abrasión, la microestructura, porosidad y microdureza de un recubrimiento de Babbitt SAE 12 depositado mediante la técnica de Arco Eléctrico. La resistencia al desgaste abrasivo se evaluó de acuerdo a la norma ASTM G 65. La microestructura y composición de los recubrimientos fueron estudiadas a través de un microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope - SEM) acoplado al espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDRX). Técnicas de análisis de imágenes fueron utilizadas para determinar la porosidad en los recubrimientos. La microdureza Vickers se realizó utilizando una carga de 50 gr. Los resultados muestran que los recubrimientos realizados con los parámetros de operación del proceso de rociado por Arco Eléctrico, 120-180 Amperios combinados con 450 KPa (65 Psi) como presión de atomización, son los más adecuados para depositar estas aleaciones, ya que producen recubrimientos con mayor resistencia al desgaste abrasivo, una microestructura más homogénea y bajo porcentaje de porosidad cuando se comparan con los demás parámetros de deposición estudiados.

Los autores Guzman, M. y Pardi, S. (2011) presentan un trabajo que tiene por objeto la determinación de los parámetros de deposición óptimos de polvos nanoestructurados de WC-12%Co vía proyección térmica HVOF sobre un acero 1020. A través de los resultados obtenidos en el presente trabajo se pudo determinar que el flujo de combustible y la tasa de alimentación de los polvos son parámetros significativos en la resistencia al desgaste abrasivo de los

depósitos estudiados, en líneas generales a medida que disminuye el flujo de combustible aumenta la tasa de desgaste lo cual es atribuido a que disminuye la temperatura del proceso y por lo tanto se obtiene menor cohesión entre las partículas y aumenta la porosidad, por otro lado también se pudo determinar que a medida que se aumenta la tasa de alimentación de los polvos disminuye la tasa de desgaste debido a las partículas alcanzan menores temperaturas evitando la degradación de las mismas. Para la dureza de la sección transversal el parámetro significativo es el flujo de combustible debido a que mientras menor sea el flujo de combustible hay mayor degradación de carburos producto del oxígeno sobrante en la mezcla y si se tiene un mayor flujo de combustible se obtiene mayor descarburación debido a las altas temperaturas. Adicionalmente no se encontró correlación entre la dureza en la sección transversal y la respuesta ante el desgaste abrasivo en los recubrimientos evaluados. A la luz de los resultados obtenidos a través de esta investigación podemos decir que elevados valores de dureza y alta resistencia al desgaste abrasivo pueden obtenerse en recubrimientos WC-12%Co nanoestructurados depositados por el proceso de HVOF.

Bello, A. y Tuesta, W. (2013) estudiaron los efectos de la abrasión de un recubrimiento electrolítico de Cromo Duro utilizando como contraparte al acero AISI D-2. En el estudio del desgaste por abrasión se utilizó un equipo construido según a la norma G65-00, con cargas aplicadas de 1, 12, 2.23, 3.34 y 4.45N con tiempos de 60, 150 y 300s girando a 239 rpm, obteniéndose que la pérdida volumétrica presente aumenta a medida que se incrementa la carga aplicada y aumenta igualmente a medida que se recorría mayores distancias dentro de las categorías ensayadas. Los valores de las tasas de desgaste encontradas en el presente trabajo corresponden a un mecanismo de desgaste suave (menores a $1E-05\text{mm}^3/\text{m}$). Aunque el cromo duro era y es hoy en día aún muy utilizado en la industria, actualmente está siendo penalizado por ciertos organismos reguladores ya que es contaminante para el medio ambiente.

Andrade, P. y Castro, M. (2013) presentan el estudio del comportamiento ante el desgaste por abrasión de un recubrimiento Stellite 6 de base cobalto-cromo-molibdeno utilizando la técnica de soldadura de plasma de arco transferido sobre un sustrato de acero AISI 1020. Para el desgaste por abrasión, el Stellite 6 presentó un buen comportamiento, gracias al gran espesor de recubrimiento, predominando un mecanismo de desgaste abrasivo. Se demostró que la pérdida volumétrica es directamente proporcional al incremento de la carga y del tiempo, a mayor tiempo y mayor carga, mayor es el volumen desgastado. Debido a que aquí no se usaron cargas reglamentarias expuestas en la norma ASTM G-65 ya que el recubrimiento no se adaptó a la misma, estos resultados no pueden ser comparados con los que se presentaran en la actual investigación.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar, comparar y analizar la resistencia al desgaste por abrasión de tres recubrimientos:

- base hierro-Boro (Fe_2B) (conocido comercialmente como ALPHA PLUS®),
- una mezcla mecánica entre base hierro-Boro (ALPHA PLUS®) y Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico y
- una mezcla mecánica entre un material base hierro compuesto principalmente de C, Cr y Mn (conocido comercialmente como Metco 8222) y Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico;

aplicados por el método de rociado térmico por arco eléctrico.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Evaluar la resistencia a la abrasión del recubrimiento ALPHA PLUS® rociado térmicamente por arco eléctrico sobre un acero AISI 1018 siguiendo la norma ASTM G65.
- Evaluar la resistencia a la abrasión del recubrimiento pseudo-aleación de ALPHA PLUS® con Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico, rociado térmicamente por arco eléctrico sobre un acero AISI 1018 siguiendo la norma ASTM G65.
- Evaluar la resistencia a la abrasión del recubrimiento pseudo-aleación de Metco 8222 con Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico, rociado térmicamente por arco eléctrico sobre un acero AISI 1018 siguiendo la norma ASTM G65.
- Comparar y analizar la resistencia a la abrasión entre los tres recubrimientos mencionados.
- Determinar la dureza en la superficie de los recubrimientos y en la sección transversal de los mismos mediante el ensayo de microindentación Vickers.
- Determinar mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) los mecanismos de desgaste presentes en la superficie desgastada así como también características de la macroestructura de los recubrimientos.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tribología.

La tribología (del griego tribos, "frotar o rozar") es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento. El término es usado universalmente desde finales del siglo XX. Antes del nacimiento de la tribología como ciencia se pensaba en el término "lubricación" o ingeniería de lubricación. No se había generalizado la disminución de la fricción y el desgaste como prácticas cotidianas. La tribología trata de prevenir el desgaste con mejores diseños y prácticas de lubricación.

Para entender a la tribología se requiere de conocimientos de física, de química y de la tecnología de materiales. Las tareas del especialista en tribología (tribólogo) son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento.

2.1.1. Fundamentos de la tribología.

La tribología se centra en el estudio de tres fenómenos:

1. La fricción entre dos cuerpos en movimiento.
2. El desgaste como efecto natural de este fenómeno.
3. La lubricación como un medio para reducir el desgaste.

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes. De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes del desgaste en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total

del producto bruto (\$200 mil millones de dólares por año en 1966), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria.

2.1.2. Fricción.

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción cinética) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo.

Las leyes experimentales fundamentales que gobiernan la fricción de cuerpos sólidos fueron nombradas por Coulomb en 1875. Las leyes son definidas en los siguientes términos:

- La fricción estática debe ser más grande que la fricción cinética (o dinámica).
- La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
- La fuerza de fricción es independiente del área de contacto.

La fricción permite iniciar y detener el movimiento de cualquier proceso mecánico. Pero en forma más amplia gobierna gran cantidad de fenómenos tecnológicos de la más variada naturaleza. Muchos son los mecanismos que generan la fuerza de fricción. Incluso los métodos de medida pueden alterar los resultados obtenidos. La presencia de óxidos o películas interpuestas entre las superficies también pueden hacer variar los resultados.

2.1.3. Desgaste.

El desgaste es un proceso de daño superficial progresivo que se produce por efecto del contacto mecánico entre dos materiales, que involucra pérdida y/o daño del material sometido a este efecto debido al movimiento relativo entre las superficies.

El desprendimiento de material originado por el desgaste de una pieza mecánica puede variar notablemente, de muy intenso a insignificante. En cualquier caso, resulta de ello una pérdida de eficacia o un deterioro de la pieza.

El problema de desgaste se presenta en todo tipo de sistemas industriales. Los casos más graves se presentan en determinadas industrias: minas, complejos azucareros, siderúrgicos, petroleros, químicos y centrales eléctricos, por solo mencionar algunas. Por ejemplo, en un estudio realizado en la Universidad de Michigan, Estados Unidos de América, afirma que un camión de cinco toneladas, completamente desgastado, pesa sólo 2.3 kilogramos menos que cuando estaba nuevo (Porrás, 2007). Lo que permite tener la perspectiva de que un desgaste que pareciera ser insignificante puede comprometer completamente un sistema mecánico.

El desgaste no se considera una propiedad inherente del material, pues solo se produce por la interacción de los cuerpos en contacto o en movimiento y está determinado, en gran medida, por condiciones externas independientes de la naturaleza del material.

Además, el desgaste en la maquinaria es uno de los factores que más influye en la depreciación de una fábrica. Por lo tanto se pueden reducir los costos o aumentar los beneficios prolongando la vida de la maquinaria.

La tecnología de los recubrimientos protectores puede contribuir a la solución de numerosos problemas de desgaste mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro superficial como la abrasión, corrosión, erosión, entre otros.

Esta tecnología puede contribuir a reducir o evitar los siguientes inconvenientes:

- Paros de producción
- Gastos por reparación
- Retraso de las entregas
- Reclamaciones
- Pérdida de ventas

A objeto de poder seleccionar un sistema de aleación apropiado para cada caso, es de primordial importancia poder determinar con el mayor grado de aproximación posible, el tipo de desgaste al cual se le atribuye el fenómeno de deterioro superficial. De lo anterior se desprende la necesidad de conocer y entender los principales mecanismos de desgaste con los cuales se enfrenta la industria en su operación.

2.1.4. Tipos de desgaste.

Una discriminación de la importancia relativa de distintos tipos de desgaste en la industria, ha sido estimada en los siguientes términos:

Tipo de Desgaste	% de presencia
Abrasión	50 %
Adhesión	15 %
Erosión	8 %
Desgaste micro-oscilatorio ("Fretting")	8 %
Desgaste químico	5 %

Tabla 2.1 Tipos de desgaste en la industria.

Fuente: Eyre (1978).

En la práctica no existe un ejemplo práctico donde se manifieste un tipo de desgaste únicamente.

2.1.4.1. Desgaste adhesivo.

La adhesión está asociada a toda formación y posterior rompimiento de enlaces adhesivos entre las interfaces, cuando dos superficies son colocadas en contacto íntimo. La adhesión conlleva además al soldado en frío de las superficies. Con respecto al desgaste adhesivo, el papel principal lo juega la interacción entre las superficies y su grado de limpieza, es decir, cuando el acercamiento entre los cuerpos es tal, que no se presenta ningún tipo de impurezas, capas de óxido o suciedades, se permite que el área de contacto sea aumentada, pudiéndose formar uniones adhesivas más resistentes.

El desgaste adhesivo es ayudado por la presencia de altas presiones localizadas en las asperezas en contacto. Estas asperezas son deformadas plásticamente, permitiendo la formación de regiones soldadas localizadas. El desgaste adhesivo ocurre como resultado de la destrucción de los enlaces entre las superficies unidas, permitiendo que parte del material arrancado se transfiera a la superficie del otro. Así, la superficie que gana material aumenta su rugosidad

con el agravante de que cuando el movimiento continua, se genera desgaste abrasivo contra la otra superficie.

Piezas de maquinaria donde está normalmente involucrado el desgaste adhesivo, son: sistemas, biela-seguidor, dados de extrusión-alambre, cola de milano-apoyo, engranajes, rodamiento-apoyo y herramientas de corte, son elementos que pueden sufrir desgaste debido a adhesión.

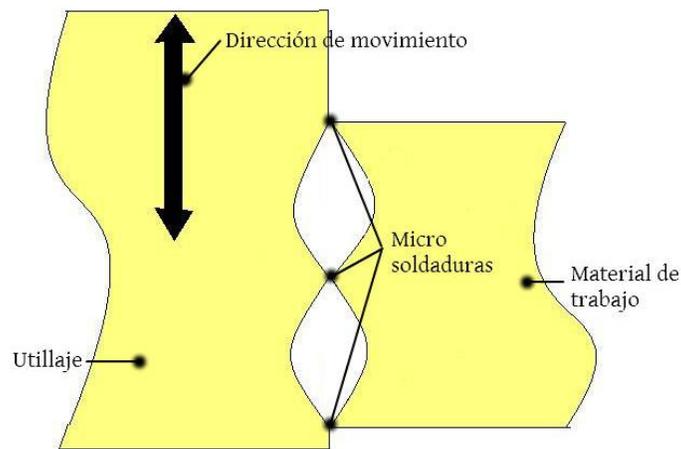


Figura 2.1 Desgaste Adhesivo.

Tomado de:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Desgaste_adhesivo.jp](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Desgaste_adhesivo.jpg)

g

2.1.4.2. Desgaste por fatiga de contacto.

Este tipo de desgaste ocurre cuando piezas son sometidas a elevados esfuerzos, los cuales provocan la aparición y propagación de grietas bajo la acción repetitiva de estos. En el caso de piezas sometidas a deslizamiento, las capas superficiales sufren intensas deformaciones como resultado de la acción simultánea de las tensiones de contacto y de la fuerza de fricción. Los esfuerzos

a los que están sometidos los materiales particularmente en las capas superficiales, promueven en la mayoría de los casos, alteraciones en la estructura cristalina y en el tamaño de grano.

El picado originado a partir de grietas, es una de las fallas por fatiga de contacto superficial típica de elementos de máquinas, los cuales trabajan bajo régimen de lubricación elasto-hidrodinámica y elevadas cargas superficiales. Este es el caso de cojinetes de rodamiento y ruedas dentadas en su punto de contacto. Aquí, el mecanismo principal de falla es la aparición y propagación de grietas después que las superficies han almacenado una determinada deformación plástica.

2.1.4.3. Desgaste por Impacto.

Se produce por transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Produce deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma y dimensión lo que puede devenir en la fractura por fatiga debido a los impactos repetidos.

2.1.4.4. Desgaste por Cavitación.

El desgaste por cavitación ocurre cuando un líquido en circulación está sujeto a cambios rápidos de presión que causan formación de burbujas en la región de bajas presiones.

Estas burbujas comienzan a inestabilizarse y a colapsar al entrar en áreas de mayor presión. El ataque continuo sobre la superficie del material por el colapso de estas burbujas es conocido como cavitación. La continua implosión de burbujas causa tensiones cíclicas y fatiga en la superficie del material manifestándose como “pitting” superficial que puede luego actuar como centro

de nucleación para ataques corrosivos del medio líquido. Este tipo de desgaste se produce en elementos en los cuales la dirección del líquido sufre cambios repentinos.

Aunque hasta la fecha se ha tenido un enorme avance desde la publicación del artículo de Lord Rayleigh, un entendimiento completo del fenómeno aún está lejos de ser alcanzado y aún es mucho lo que debe ser estudiado de este tópico. Los efectos que el desgaste por cavitación provocan, van desde la pérdida de eficiencia, hasta la inutilización completa del equipo. Hasta hoy no hay una manera de preverse el desgaste de un equipo sujeto a cavitación y las paradas para mantenimiento de un equipo aún son estipuladas con base en la experiencia de los operadores. Sin embargo hoy tenemos dos maneras de lidiar con el problema de la cavitación: uno es el desarrollo de materiales más resistentes y otro, es mejor el diseño de equipos hidráulicos evitando caídas de presión muy bruscas.

2.1.4.5. Desgaste por Corrosión.

Se define a la corrosión, como un ataque químico y electro-químico sobre un material, debido al ambiente que lo rodea. La actividad corrosiva de la sustancia destructora depende de factores que influyen sobre el transcurso de la reacción química: temperatura, presión y concentración del factor.

Es frecuente encontrar desgaste corrosivo en casi todos los sectores de la industria, particularmente donde las piezas están en contacto con agua fresca o salada, en ambientes básicos o ácidos, o cuando las mismas están expuestas a gases a temperaturas normales o elevadas (motores de combustión interna por ejemplo). En una forma u otra, la corrosión está presente en virtualmente todos los procesos industriales.

En algunas ocasiones, las reacciones químicas ocurren primero y son seguidas por una remoción de los productos de la corrosión mediante una acción mecánica (abrasión), de otra manera, la acción mecánica podría preceder a la acción química dando como resultado la creación de pequeñas partículas de desperdicio.

2.1.4.6. Desgaste Micro-oscilatorio. “Fretting”.

El “fretting” consiste en movimientos oscilatorios de pequeña amplitud que pueden ocurrir entre superficies en contacto. Una de las consecuencias inmediatas de este proceso, en condiciones atmosféricas normales, es la producción de fragmentos de óxido.

El desgaste por fretting ocurre entre dos superficies en contacto (no necesariamente moviéndose tangencialmente), las cuales experimentan pequeñas oscilaciones cíclicas (del orden de 1 a 100 μ m). Cuando algunas vibraciones aparecen en las superficies en contacto, ocurren pequeños deslizamientos en la dirección del movimiento relativo, esos pequeños deslizamientos son causa de desgaste por fretting.

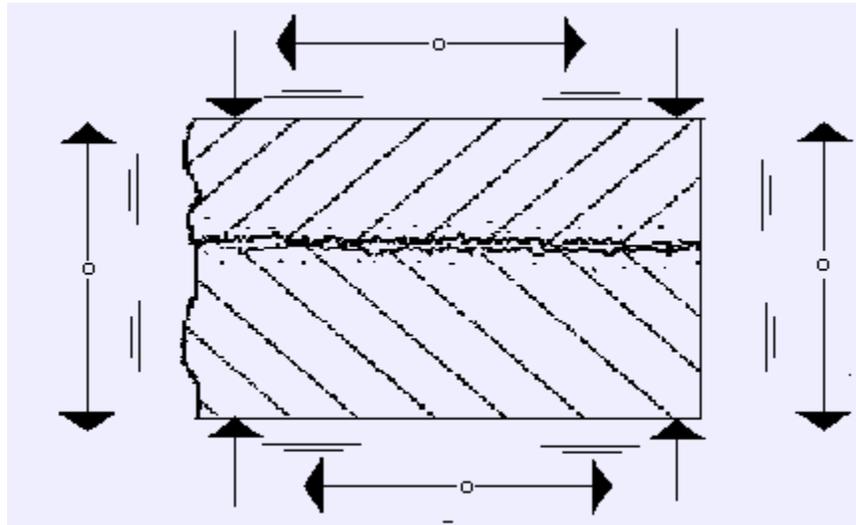


Figura 2.2 Desgaste Micro-oscilatorio (“Fretting”).

Tomado de: <http://www.geocities.ws/electodes/fretting.htm>.

2.1.4.7. Desgaste por Erosión.

Es la pérdida de material como resultado del impacto repetido de pequeñas partículas. Ocurre cuando partículas duras son atrapadas en un medio líquido o gaseoso que hace impacto sobre un sólido a una velocidad significativa. Las variables fundamentales que influyen en la erosión pura son: la velocidad, ángulo de incidencia, concentración y forma de las partículas. Se considera a la erosión como una forma de abrasión producida por esfuerzos de contacto relativamente bajo, debido al impacto de partículas sobre una superficie.

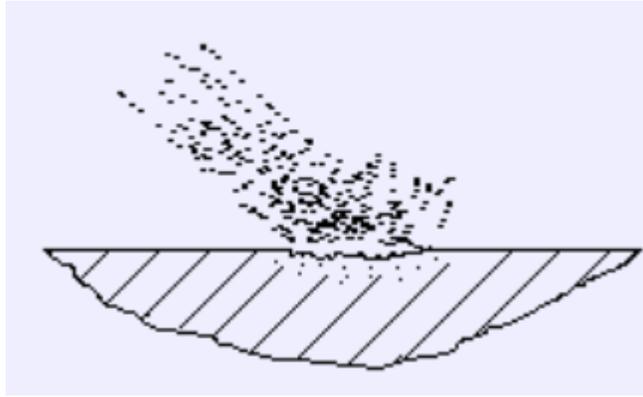


Figura 2.3 Desgaste por Erosión.

Tomado de: <http://www.geocities.ws/elecodes/erosion.htm>

El desgaste por erosión está presente, en equipos y líneas de bombeo para fluidos con sólidos en suspensión, boquillas de equipos para granallado por arena (“sand-blasting”), etc.

La velocidad de desgaste por erosión se incrementa con el aumento de la velocidad de las partículas. Si los ángulos de impacto son pequeños predomina el corte abrasivo; siendo la dureza superficial un factor crítico. En caso contrario, si los ángulos de impacto son grandes el desgaste es debido principalmente a deformación y fractura. Un material blando podría resistir mejor la erosión que un material duro. Por ejemplo, el caucho natural o sintético produce buenos resultados debido a su bajo módulo elástico, lo que le permite grandes deformaciones y una buena distribución de la carga.

2.1.4.8. Desgaste por Abrasión.

Este desgaste puede definirse como la acción que provoca, en una superficie, el movimiento unidireccional de partículas discretas de otro material que generalmente trae consigo pérdidas progresivas de material y está dado por el movimiento relativo entre la superficie y la sustancia que hacen contacto.

Diferencia entre desgaste abrasivo y erosivo.

Si bien es cierto que en ocasiones se describe a la erosión como una forma de abrasión. Es necesario marcar la diferencia entre estos términos. La erosión se refiere más bien al desgaste producido por el choque de partículas, transportadas por un fluido, sobre una superficie en cierto ángulo. Mientras la abrasión es el desgaste producido por el desplazamiento de las partículas a lo largo de la superficie por la acción o movimiento de otro cuerpo.

2.2. Fenómeno de Abrasión.

2.2.1. Definición de abrasión.

La Abrasión, es definida por la ASTM (American Society Testing Materials), como "el daño a una superficie sólida que implica generalmente la pérdida progresiva de material y es debido al movimiento relativo entre la superficie y una o varias sustancias en contacto". Además afirma que "se origina por partículas o protuberancias duras que son forzadas una contra otras y se mueven a lo largo de una superficie sólida".

Se considera desgaste abrasivo el desgaste que sufre la superficie de un metal bajo la acción de partículas abrasivas, que en forma continua rozan a lo largo de dicha superficie, y se provocan un desprendimiento gradual de material de la superficie desgastada por la fricción de estas partículas abrasivas. El daño de la superficie supone desplazamiento y separación de partículas, acelerado por el calor desarrollado en la fricción.

Gran porcentaje de las teorías de desgaste se apoyan en el concepto de que la abrasión es el proceso de rayado asumiendo la punta del abrasivo como un

cono anguloso. Por lo tanto, se enfocan en demostrar el efecto de dicho cono deslizándose a través de la superficie estudiada. Debido a esto varias ecuaciones han sido derivadas para relacionar el desgaste y las otras propiedades, la más conocida es la ecuación de Archard que fue deducida para el desgaste adhesivo, sin embargo es muy útil para el desgaste abrasivo. Cuando un grano abrasivo remueve material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que se obtiene se describe por:

$$W = A \cdot d \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

W: Volumen de material removido

A: Sección transversal de la ranura

d: Distancia de desplazamiento

De igual manera la sección transversal de la ranura depende de la estructura del grano abrasivo, el cual se representa por el factor k_1 y con una profundidad de penetración p . Dicha profundidad de penetración está en función de la dureza del material H , la carga aplicada L y de la forma del grano abrasivo al igual que la sección transversal de la ranura, representado por k_2 . Resultando la ecuación de Archard como:

$$H = k_3 \frac{L \cdot d}{H} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde k_3 es una constante que abarca las otras. Existen factores que afectan a k_1 , por ejemplo, cuando estamos en presencia de corte o arado el abrasivo puede deslizarse evitando así el desgaste, por derrumbamiento puede no ser efectivo, durante el final de su trayectoria de contacto, etc.

Normalmente un material posee una buena o mala resistencia al desgaste cuando se refiere al recíproco del volumen desgastado:

$$R = \frac{1}{w} \qquad \text{Ec. 2.3}$$

La ecuación de Archard, con ciertas modificaciones es ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más complejas.

El efecto de la abrasión es particularmente evidente en áreas industriales de la agricultura, procesamiento de minerales, movimientos de tierra y esencialmente en cualquier área en que se manipule roca, minerales, escoria, etc.

2.2.2. Física-Química del desgaste abrasivo.

Se considera que todo desgaste abrasivo del material es un agrietamiento por fragilidad, como resultado de actos de deformación plástica y endurecimiento que se repiten cíclicamente.

El proceso de desgaste abrasivo en condiciones reales, se realiza siempre con la colaboración no solamente de los granos abrasivos, sino también del medio exterior, de una composición química controlada (en el caso de los medios lubricantes), o no controlada (en el caso de la atmósfera).

El metal deformado plásticamente, al reaccionar con el oxígeno contenido en la atmósfera y en los medios lubricantes, forma estructuras de capas secundarias, que se diferencian del metal original por sus estructuras y propiedades de resistencia. La actuación de las presiones produce la destrucción de estas capas y el descubrimiento consecutivo de nuevas superficies del metal puro. Este fenómeno se conoce con el nombre de desgaste oxidante.

En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad será la resistencia que opone a la rotura el material deformado. El desgaste abrasivo depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre las partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. A manera de resumen puede decirse que el grado de abrasión es reflejado mayormente por la naturaleza de las partículas abrasivas, su forma, su tamaño y dureza y por el grado de humedad en la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión o el impacto aplicado por la partícula abrasiva, el ángulo de incidencia con la superficie y la velocidad relativa de las partículas abrasivas en relación con la superficie de desgaste.

Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones provenientes de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas y en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc.

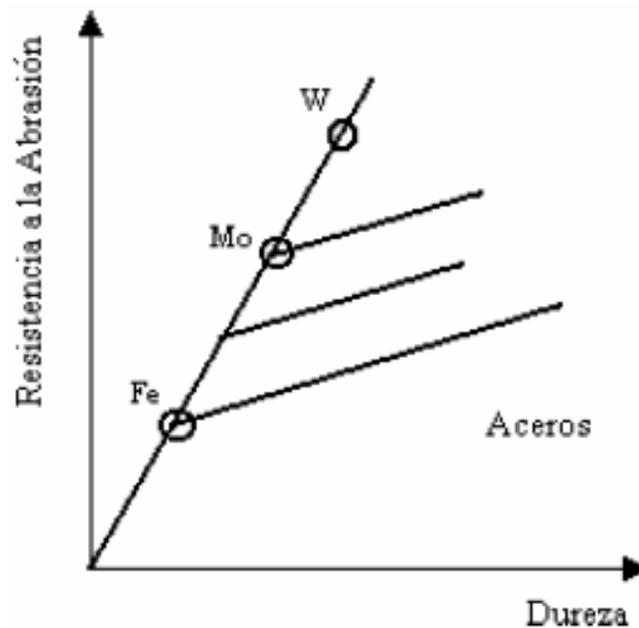


Figura 2.4 Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.

Fuente: Bilbao, C. y Moreno, I. (2002).

Por otra parte, en la Figura 2.4 observamos como la dureza aumenta la resistencia a la abrasión y en la Figura 2.5 que el contenido de carbono hace disminuir la abrasión en los aceros. De acuerdo al gráfico, se observa que la martensita presenta mejor resistencia a este fenómeno, entre las tres microestructuras que se comparan, pero también se han tenido buenos resultados con refinamientos de perlita y esto se atribuye a una tasa alta de endurecimiento por deformación.

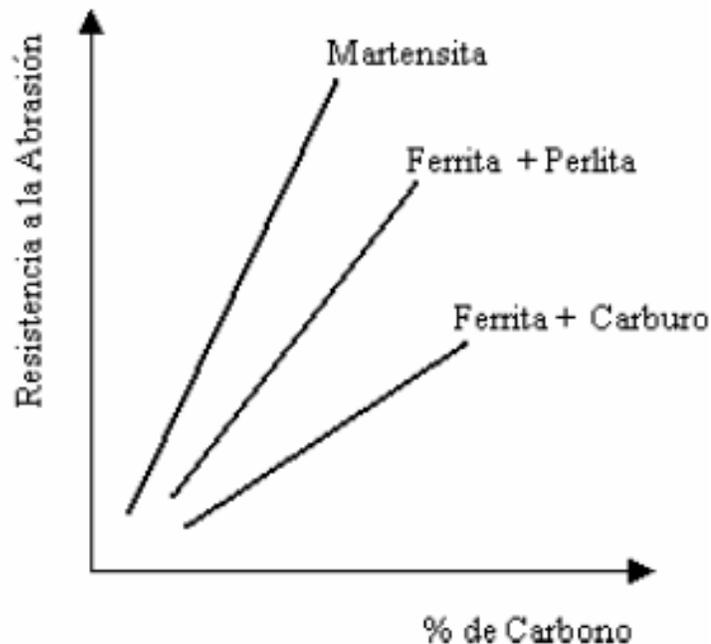


Figura 2.5 Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión.

Fuente: Bilbao, C. y Moreno, I. (2002).

En general, para metales ferrosos, las mejores resistencias al desgaste se obtienen en matrices martensíticas, con carburos secundarios uniformemente distribuidos. Cuando la dureza de los carburos es aumentada mediante una aleación, la resistencia al desgaste también aumenta, pero hay que tener en cuenta la dureza de las partículas abrasivas. Si se requiere una matriz más tenaz, para condiciones de impacto fuertes, es más recomendable una estructura austenítica inestable, la cual tiende a endurecerse por deformación o sufrir transformación de fase, o bien ser sometida a ambos procesos durante el trabajo de abrasión (Babaresco y Klisans, 2000).

Con relación al material abrasivo: tamaños reducidos, formas redondeadas, disminución de las velocidades y de las cargas de impacto, son todos factores que hacen disminuir el fenómeno de la abrasión.

En general los factores más importantes que hacen disminuir la abrasión son los siguientes:

- Aumento de la dureza.
- Aumentos del contenido de carbono y carburos duros.
- Control de la relación entre la dureza superficial y del abrasivo.
- Disminución del tamaño de las partículas abrasivas.
- Partículas abrasivas con formas redondeadas.
- Disminución de velocidades.
- Disminución de cargas.

2.2.3. Tipos de desgaste abrasivo.

Abrasión según el tipo de contacto y ambiente donde se desarrolla:

- Abrasión de dos cuerpos: el desgaste ocurre por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto. Un ejemplo de este tipo de abrasión se presenta en las máquinas de rectificado.
- Abrasión de tres cuerpos: se presenta cuando entre dos superficies con movimiento relativo hay partículas duras que actúan como abrasivos provocando el desgaste. Un ejemplo se presenta cuando en las bombas de tornillo, la arena y otras partículas, pasan entre el tornillo y la carcasa de la bomba produciendo desgaste.

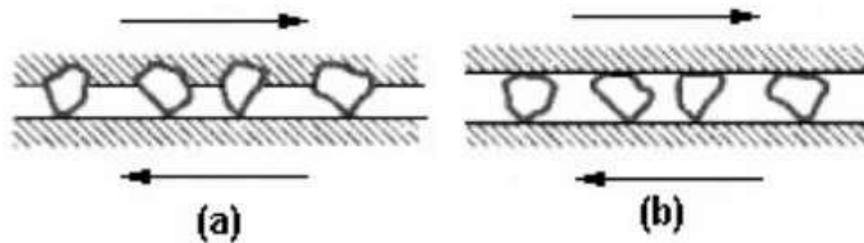


Figura 2.6 (a) Desgaste abrasivo entre dos cuerpos. (b) Desgaste abrasivo entre tres cuerpos.

Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira.

Según el tipo de ambiente:

- Abrasión cerrada: cuando la abrasión se produce en un espacio sin contacto con el ambiente exterior.
- Abrasión abierta: se lleva a cabo bajo la influencia del ambiente exterior.

El desgaste abrasivo también puede clasificarse en:

Abrasión pura o de bajo esfuerzo:

Ocurre cuando las partículas que actúan como abrasivo se deslizan libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño, generalmente menor a 15 grados.

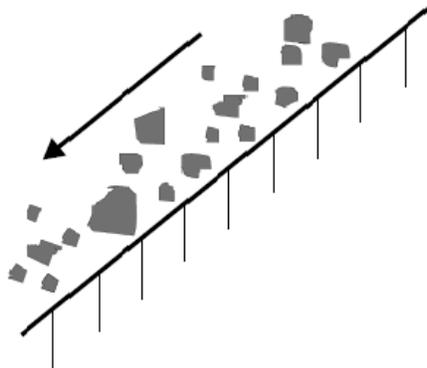


Figura 2.7 Abrasión de bajo esfuerzo.

Fuente: Torres, E. (2012).

Abrasión de alto esfuerzo:

Es un fenómeno de surcado, producto del contacto a altas presiones del abrasivo sobre la superficie. Este tipo de desgaste está tipificado en las masas de los rodillos trituradores de las máquinas azucareras, en donde partículas de arena, la caña de azúcar, etc. Son desplazadas bajo altas presiones. El deterioro ocurre por flujo plástico local y agrietamiento microscópico de la superficie de la masa, exacerbado por fenómenos corrosivos.

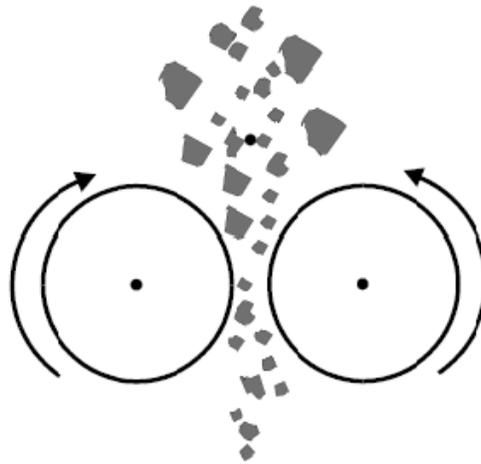


Figura 2.8 Abrasión de alto esfuerzo.

Fuente: Torres, E. (2012).

Abrasión por desgarramiento (“Gouging”):

Este tipo de abrasión se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, que someten a la superficie a un alto grado de impacto y esfuerzo de compresión. El ángulo de incidencia es generalmente mayor que en el caso del mecanismo de abrasión de bajo esfuerzo. La remoción del material en abrasión por desgarramiento se debe a la deformación plástica, subsecuente endurecimiento y desgarre de las partículas metálicas.

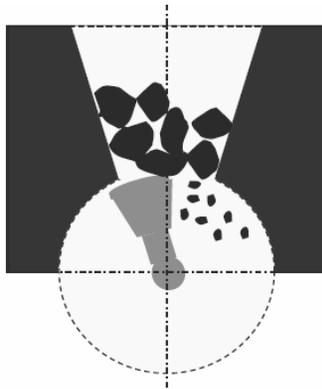


Figura 2.9 Abrasión por desgarramiento.

Fuente: Torres, E. (2012).

Desgaste abrasivo con impacto:

Este tipo de abrasión involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo cuyas partículas son de tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado.

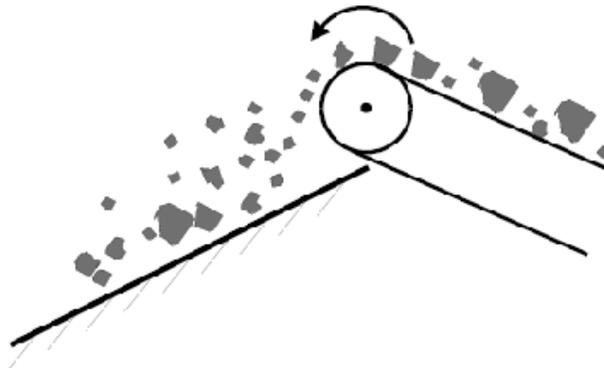


Figura 2.10 Desgaste abrasivo con impacto.

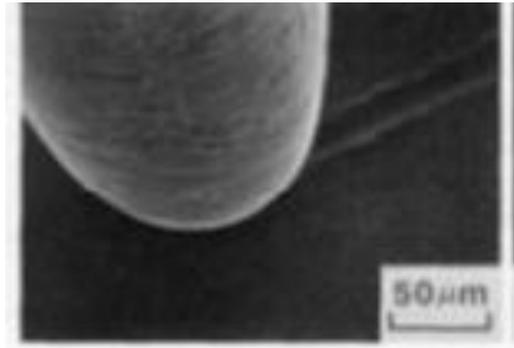
Fuente: Torres, E. (2012).

2.2.4. Mecanismos de desgaste abrasivo.

Los cuatro fenómenos que explica el desgaste por abrasión microarado, microcorte, microfisuración y microfatiga. De los cuales los procesos de microcorte y microarado son los mecanismos dominantes en materiales dúctiles, por el contrario el proceso de microfisuración se presenta, predominantemente, en materiales frágiles.

- **Microarado.**

Ocurre cuando se desplaza material de una muesca a los lados, generalmente se presenta bajo cargas ligeras y trae como consecuencia pérdida real del material, los daños se producen cerca de la superficie del material en forma parecida a lo que ocurre en un trabajo en frío. Si posteriormente se produce el rayado sobre la superficie trabajada en frío, entonces la pérdida de material deberá estar a cargo de la microfatiga.



Microarado observado en un microscopio electrónico de barrido.

Tomado de: Universidad Tecnológica de Pereira.

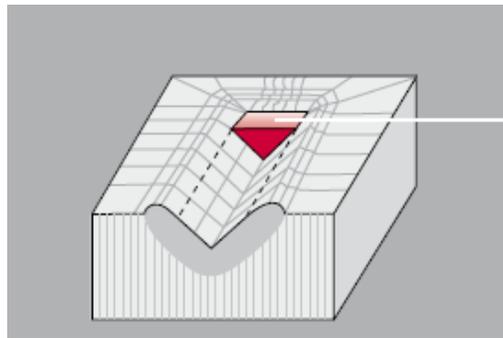
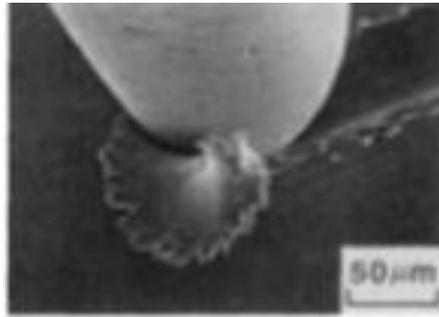


Figura 2.11 Microarado.

Fuente: METALOGENIA S.A.

- **Microcorte.**

Es la forma más severa de desgaste para materiales dúctiles, ya que la punta del abrasivo remueve una viruta parecido a como lo haría una herramienta de maquinado lo que conlleva a una pérdida de material, pero con una baja remoción en comparación con el tamaño de muesca. Para una partícula abrasiva (de forma angular) existe un ángulo crítico para el cual ocurre el proceso de transición entre el arado y el corte, que depende del material que está sometido a abrasión.



Microcorte observado en un microscopio electrónico de barrido.

Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira.

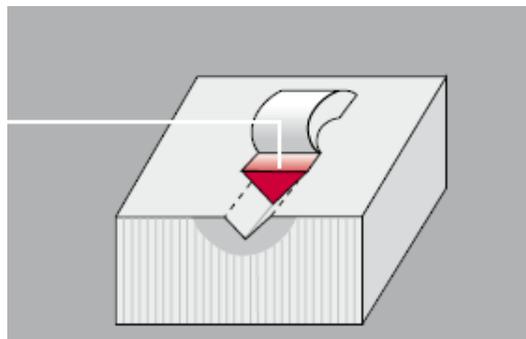


Figura 2.12 Microcorte.

Fuente: METALOGENIA S.A.

- **Microagrietamiento.**

Ocurre cuando las partículas producen tensiones altamente concentradas en el material formando grietas y ayudando a la propagación de las ya existentes, haciendo que se desprendan grandes superficies.

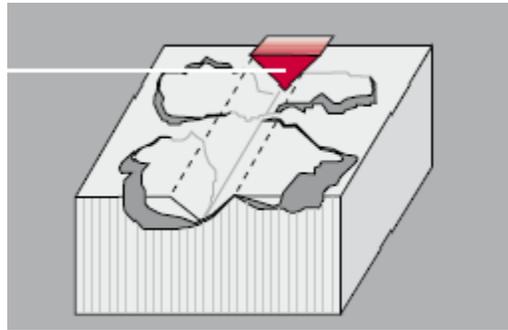


Figura 2.13 Microagrietamiento.

Fuente: METALOGENIA S.A.

- **Microfatiga.**

Es la pérdida de material en una superficie que ocurre cuando se le aplica un esfuerzo adicional a una superficie que se raya.



Figura 2.14 Microfatiga.

Fuente: METALOGENIA S.A.

2.2.5. Variables que intervienen en el desgaste abrasivo.

Existen diversos factores que influyen directamente en el desgaste abrasivo cuando éstos varían, los principales son los siguientes.

2.2.5.1. Abrasivo.

Entre las características del abrasivo se encuentran: dureza, tenacidad y tamaño del abrasivo. La dureza de las partículas abrasivas es importante para la tasa de abrasión a la que está sujeto el material. A medida que la dureza de los abrasivos supera al de los materiales de desgaste, el desgaste por abrasión resulta ser más severo. Si el abrasivo es más blando, la velocidad de desgaste es lenta. Por último, cuando las durezas son similares un leve cambio del valor de una de ellas puede aumentar considerablemente el desgaste.

La forma de la partícula abrasiva es importante, porque determina como penetra en la superficie del material desgastado e influye en la forma de la ranura producida en el material.

2.2.5.2. Propiedades del material.

Una variedad de características de los materiales han demostrado tener una correlación con el desgaste abrasivo o tener algún efecto sobre él. Estas propiedades incluyen dureza, módulo de elasticidad, resistencia a la fluencia, temperatura de fusión, estructura cristalina, microestructura y composición. Por ejemplo, la microestructura es algo muy importante. La austenita y bainita de igual dureza son más resistentes a la abrasión que la ferrita, perlita, o martensita. Esto se debe a la mayor capacidad de endurecimiento por deformación y ductilidad de la austenita.

2.2.5.3. Efectos del medio ambiente.

En adición a las propiedades de un material, el medio ambiente también afecta al desgaste por abrasión. Entonces, la tasa de pérdida por abrasión no es intrínseca de un material.

- Temperatura: es de esperarse que el desgaste abrasivo aumente al incrementar la temperatura, debido a que la dureza y la resistencia a la fluencia decrecen.
- Humedad: El desgaste es casi siempre más elevado en sitios acuosos o simplemente húmedos.

2.2.5.4. Corrosión.

El desgaste abrasivo es a menudo reforzado por condiciones corrosivas, particularmente un bajo pH. Ocurre a menudo que se da un sistema de desgaste donde actúan la abrasión y la corrosión. La abrasión genera superficies nuevas que rápidamente se corroen, y normalmente la capa de protección contra corrosión se elimina por abrasión. La sinergia de un abrasivo y un componente corrosivo podría ser el doble efecto que los componentes individuales.

2.2.5.5. Velocidad de contacto.

Se ha encontrado que la tasa de desgaste abrasivo presenta un ligero aumento al incrementar la velocidad en el rango de 0 a 2.5 m/s. Este incremento en el desgaste puede ser atribuido al calentamiento por fricción.

2.2.5.6. Carga.

Se ha mostrado que el desgaste abrasivo es proporcional a la carga. Sin embargo, este efecto proporcional se rompe cuando la carga es lo suficientemente alta como para fracturar las partículas abrasivas y crear nuevos puntos agudos, que puedan aumentar el desgaste. Si los puntos de partículas abrasivas se redondean, el desgaste disminuye.

Es de destacar que, en ocasiones, pequeñas variaciones de carga pueden influir notablemente en la tasa de desgaste de una pieza.

El daño causado por los abrasivos guarda relación directa con la carga aplicada. Es decir, a mayor carga, mayor tasa de desgaste abrasivo.

Otro caso en que la carga es relevante ocurre en el Arado, que normalmente se manifiesta bajo cargas leves y trae como efecto pérdida real del material. Los daños producidos se dan cerca de la superficie del material en forma similar a lo que ocurre en un trabajo en frío (Cermeño y Ruiz, 2006).

Es importante considerar que según la ecuación de Archard el desgaste abrasivo es proporcional a la carga aplicada, es decir que mientras mayor sea la carga aplicada mayor será el desgaste abrasivo; sin embargo esta ecuación no aplica cuando la carga es lo suficientemente alta para fracturar e incluso romper las partículas abrasivas.

2.3. Rociado térmico.

2.3.1. Definición.

El rociado térmico, también conocido como termorociado o proyección térmica, es una de las técnicas utilizadas para la recuperación de superficies de materiales. Consiste en el calentamiento del material a depositar hasta obtener una forma de partículas fundidas o semi-fundidas, las cuales se transporta mediante una corriente de gas o de aire comprimido para su depósito, en el sustrato, donde se aplastan y solidifican rápidamente formando láminas (“splats”), cuyo apilamiento crea el recubrimiento.

Los revestimientos rociados térmicamente son formados por depósitos de sucesivas capas de gotas líquidas (millones de partículas por cm^2/s) que se aplanan y solidifican, resultando en una macroestructura conocida como lenticular o laminar. A lo que inciden sobre el sustrato, esas pequeñas gotas en forma de lentes se enfrían a velocidades extremadamente altas y se anclan mecánicamente en las irregularidades de la superficie. El sustrato es preparado por medio de granallado con óxido de aluminio o hierro blanco angular para aumentar la rugosidad de la superficie.

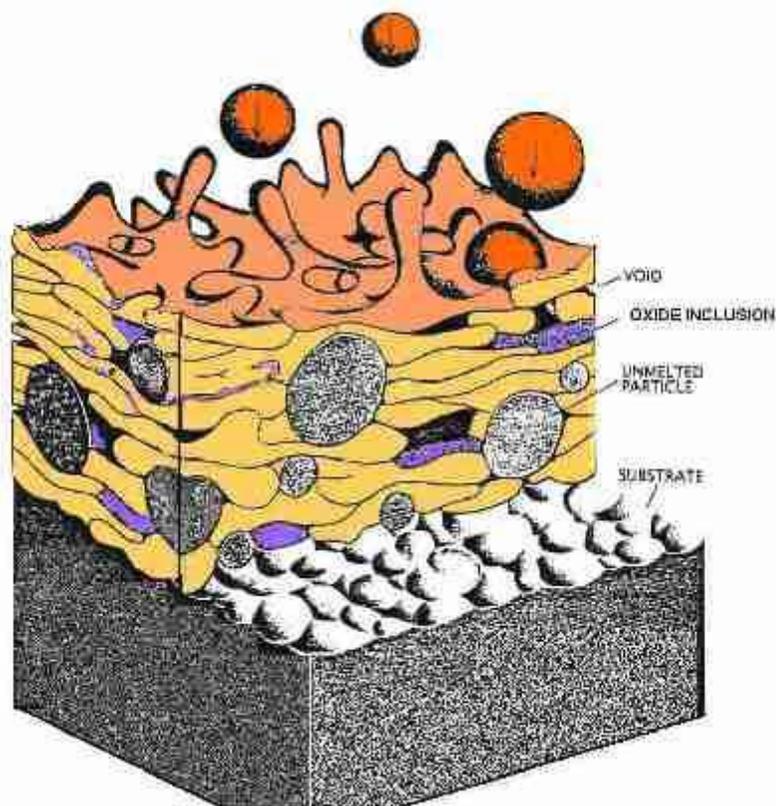


Figura 2.15 Morfología típica de un recubrimiento por rociado térmico.

Fuente: Gómez, 2009.

2.3.2. Ventajas.

El termorociado se usa extensivamente en manufactura, por su efectividad para el recuperado de superficies de piezas o elementos de máquinas, tiene las siguientes ventajas:

- Aumento de la resistencia al desgaste por: abrasión, cavitación, erosión entre otros.
- Aumento de la resistencia a la corrosión por agentes agresivos: ácidos, gases sulfurosos y solventes.
- Se logra la recuperación dimensional, donde el recubrimiento tendrá las mismas o mejores características que el recubrimiento original.
- Es un proceso de baja temperatura que no supera los 200 °C durante la deposición del recubrimiento, evitándose así las deformaciones y los cambios en la microestructura del material base, lo cual podría ser sumamente peligroso para la integridad física de la pieza.
- Los materiales utilizados en el termorociado pueden ser aplicados sobre superficies que no pueden ser soldadas, bien sea por su composición o por tener espesores muy finos.
- No se necesita la aplicación de tratamientos térmicos luego de la aplicación de los recubrimientos.

2.4. Recubrimientos.

El mecanismo de adherencia mediante anclaje mecánico y difusión produce depósitos heterogéneos, es decir, con una composición nominal determinada, más una serie de inclusiones en forma de óxidos, partículas no fundidas y porosidades.

Los materiales de aporte pueden venir en diversas formas: alambres tanto sólidos como tubulares, polvo, varillas y cordel cual es un tubo plástico lleno con polvo lo cual permite su alimentación en equipos diseñados para trabajar con material de aporte en forma de alambre.

Este material de alimentación puede ser cualquier sustancia que pueda ser fundida incluyendo metales, compuestos metálicos, cermets, óxidos, vidrios y polímeros.

Las propiedades y la calidad de los recubrimientos varían en función de los parámetros de aplicación de los equipos y métodos de rociado, entre los cuales la velocidad de la proyección de las partículas juega un papel determinante, así como la temperatura de fusión de las mismas, también la distancia de rociado, entre otros factores. Entre las características mecánicas y metalúrgicas más importantes que se pueden obtener en un recubrimiento rociado, se pueden destacar los siguientes:

- Partículas heterogéneas o porosidades.
- Adherencia al sustrato.
- Cohesión entre las partículas depositadas.

2.4.1. Porosidad.

Durante el proceso de termorociado se generan cavidades llenas de gases (principalmente aire) que son llamadas porosidades, existen otras partículas que son consideradas como porosidades también, estas son los óxidos y las partículas no fundidas o semifundidas.

Las partículas fundidas total o parcialmente que son expulsadas de la pistola de termorociado, golpean perpendicularmente contra la superficie del

sustrato y crean el recubrimiento formado por gotas aplastadas contra la superficie, por tanto, sólo las partes enfrentadas directamente con la línea de proyección se recubrirán. Un recubrimiento proyectado térmicamente tiene huecos, también definibles como poros; y en el caso de la capa adherente, partículas oxidadas, si el procesado no se realiza en vacío. La cantidad de ambos defectos depende del método empleado. La figura 2.16 muestra las gotas aplastadas contra la superficie y en el detalle se observa la aparición de poros en forma de disco que se alinean paralelos a la superficie del sustrato. La presencia de estas discontinuidades reduce la conductividad térmica y la rigidez del recubrimiento.

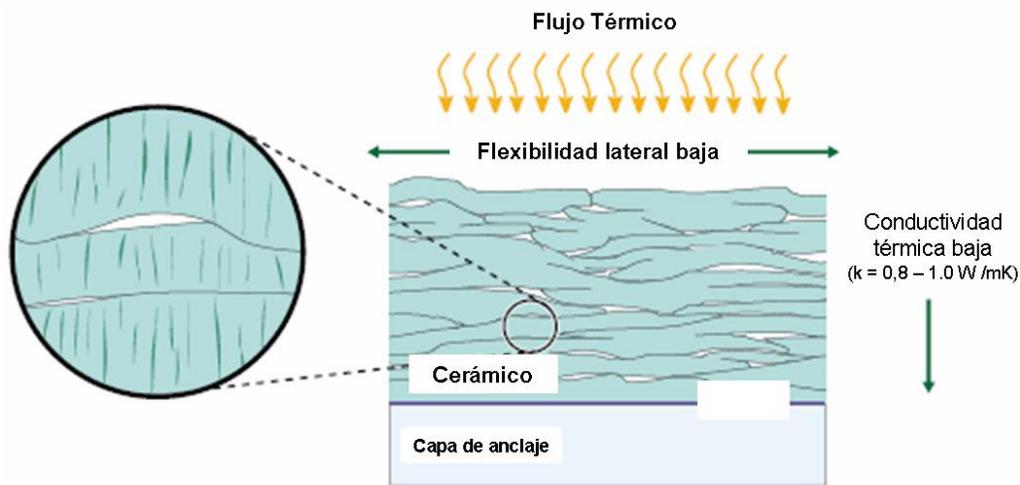


Figura 2.16 Esquema de la morfología de un recubrimiento cerámico Y-PSZ fabricado por proyección térmica.

Fuente: Gómez, 2009.

Una conductividad térmica baja es beneficiosa para conseguir un gradiente de temperatura. La orientación de las grietas y los poros del recubrimiento, según es proyectado, ayudan a reducir la conductividad térmica dependiendo del tamaño y de la forma de los poros debido a que entre las uniones entre partículas y los poros tienden a ser paralelos a la superficie y

perpendiculares al gradiente de temperatura. Por tanto, aumenta su aislamiento térmico, pero al mismo tiempo, reduce la resistencia y la rigidez de estos materiales y favorece la penetración de agentes agresivos. Aun así, los recubrimientos depositados por termorociado por arco eléctrico son estructuras efectivas para sistemas que operan a temperatura elevada como sucede en los motores diésel, en las calderas de centrales térmicas clásicas, en centrales de ciclo combinado o en motores aeronáuticos.

La técnica de termorociado por arco eléctrico oxida inicialmente a la aleación de la capa de adherencia provocando que esto pueda reducir su vida en servicio. Esta oxidación inicial puede evitarse si se procesa la capa de adherencia en vacío, aunque deben valorarse las ventajas de este método con sus costes económicos y tecnológicos.

2.4.2. Adherencia al sustrato.

Las fuerzas de adhesión se forman cuando el recubrimiento se aplica al sustrato y durante el secado de las partículas impactadas. La magnitud de estas fuerzas dependerá de la naturaleza de la superficie y el adhesivo (resina, polímero).

La adherencia no es solo de índole mecánica sino también química, razón por la cual es fundamental la limpieza superficial del material a recubrir de acuerdo a distintos métodos de preparación, el control de las distancias y ángulo de rociado.

La adherencia del recubrimiento depende de la microrugosidad superficial, y juega un papel importante en su formación inicial. La cobertura sobre el material base se desprenderá y/o será ineficiente debido a un pobre anclaje en la capa inicial de rociado. Existen diversas normas de limpieza

superficial que aseguran una buena adherencia, como el flameado, cepillado, granallado, etc. Todas estas normas tienden a aumentar el área superficial de contacto inicial, a quitar costras y óxidos que impidan la formación de los revestimientos.

2.4.3. Cohesión de las partículas depositadas.

En general, se puede decir que los recubrimientos tienen fuerzas de enlace bajas, pobre resistencia al impacto y baja ductilidad. Estas propiedades tienden a ser dictadas por "el eslabón más débil en la cadena" que en los recubrimientos es la partícula o el límite de grano y la interface del sustrato-recubrimiento. La efectividad de las fuerzas cohesivas es reducida y puede ser destruida aumentando los niveles internos de tensión.

2.5. Tipos de deposición.

Los diferentes tipos de procesos de rociado térmico, se encuentran diferenciados por las fuentes de energía utilizadas para depositar el recubrimiento como producto final en el sustrato.

2.5.1. Rociado térmico por Combustión.

Cuando el material de aporte se funde mediante la combustión, el sistema se clasifica de acuerdo a la velocidad de proyección de las partículas hacia el sustrato.

2.5.1.1. Rociado térmico por Llama subsónico (Flame Spray - FL).

Con este proceso, los polvos de metales, cerámicas, carburos o polímeros son introducidos en una llama de baja velocidad, fundidos y acelerados a velocidades subsónicas sobre el sustrato para formar así un recubrimiento. Este proceso es utilizado para realizar recubrimientos de limitada exigencia operativa, en componentes de máquinas de baja velocidad y pequeñas cargas dinámicas.

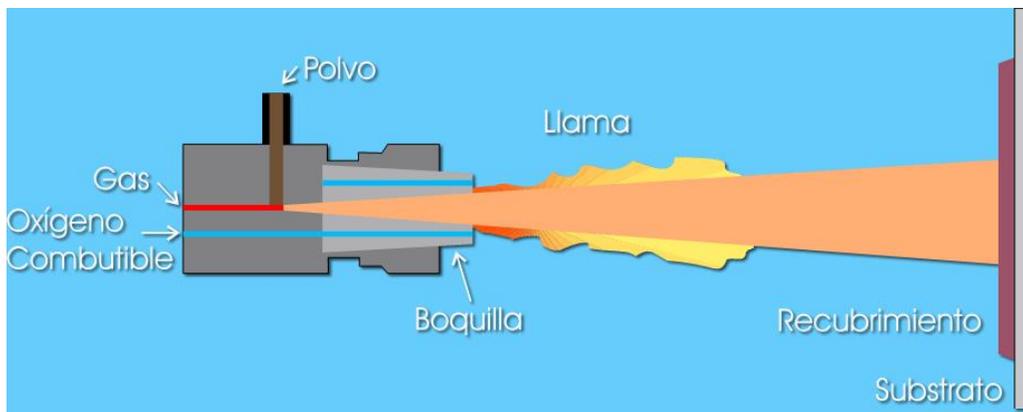


Figura 2.17 Rociado térmico por llama subsónico.

Tomado de: Plasmatec Ingenieros C.A.

2.5.1.2. Rociado térmico por Llama supersónica (High Velocity Flame - HV).

Este equipo proyecta alambres sólidos que son fundidos en una llama de muy alta velocidad (superior a Mach 1) realizando recubrimientos metálicos de alta calidad a bajo costo.

Materiales como aceros al carbono e inoxidable, bronce, aluminio, Babbitt, son proyectados sobre los componentes de máquinas y estructuras para formar recubrimientos funcionales a bajo costo. Provee recubrimientos mucho más densos y con menor contenido de óxidos que los de llama subsónica.

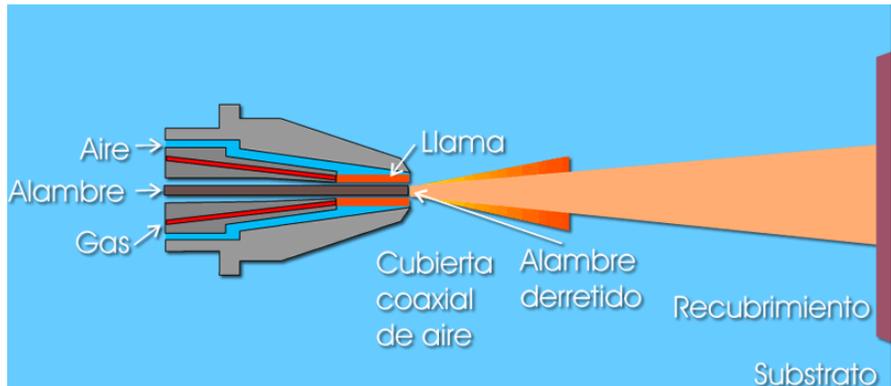


Figura 2.18 Rociado térmico por llama supersónica.

Tomado de: Plasmatec Ingenieros C.A.

2.5.1.3. Rociado térmico por Llama Hipersónica (High Velocity Oxygen Fuel - HVOF).

El proceso Combustible-Oxígeno de Alta Velocidad **HVOF** (High Velocity Oxygen Fuel) involucra la mezcla de un gas combustible (hidrógeno, propano o propileno), con oxígeno para crear un jet de combustión a temperaturas del orden de 2500 a 3000 °C. La combustión toma lugar a muy alta presión en una cámara que posee un diámetro de salida de 8 a 9 mm. Esta origina un jet de gas supersónico e imprime alta velocidad a las partículas a depositar.

La proyección térmica de Alta Velocidad (HVOF) utiliza la combustión de gases o de mezcla de gases con líquidos inflamables a elevada presión, en una cámara de combustión de forma y dimensiones adecuadas, en una tobera convergente-divergente, para que se produzca una velocidad hipersónica (Mach 4) de los gases de combustión y se aceleren de esta forma las partículas en el ducto de expansión a velocidades extremas que permitan la compactación del recubrimiento con extrema densidad, adherencia e integridad microestructural.

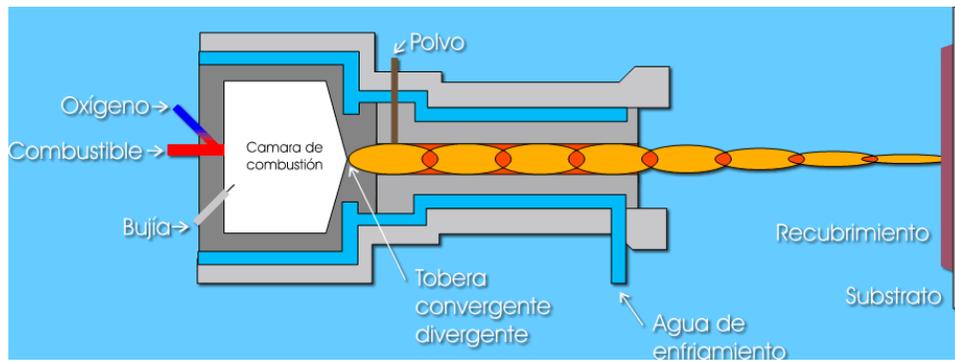


Figura 2.19 Rociado térmico por Llama Hipersónica.

Tomado de: Plasmatec Ingenieros C.A.

2.5.2. Rociado térmico por Plasma (Air Plasma Spray).

Conocido como APS (Air Plasma Spray), se basa en la generación de un plasma térmico de muy alta temperatura y alta velocidad que, al recombinarse, producirá la energía necesaria para la fusión de las partículas del polvo de alimentación y su aceleración hacia el sustrato.

Las temperaturas pueden alcanzar los 18.000 °C con velocidades de proyección de 200 a 500 m/s. La proyección por Plasma por su mayor temperatura es adecuada para toda la gama de cerámicas y carburos. La menor velocidad de esta tecnología da lugar a recubrimientos más porosos y más oxidados que el proceso HVOF.

En el proceso de Arc Spray (su nombre en el idioma inglés), se usan metales y aleaciones en forma de alambre para producir un arco eléctrico continuo entre dos de ellos, que al fundirlos permite proyectar mediante un chorro gaseoso, generalmente de aire, las partículas del material de aporte al sustrato.

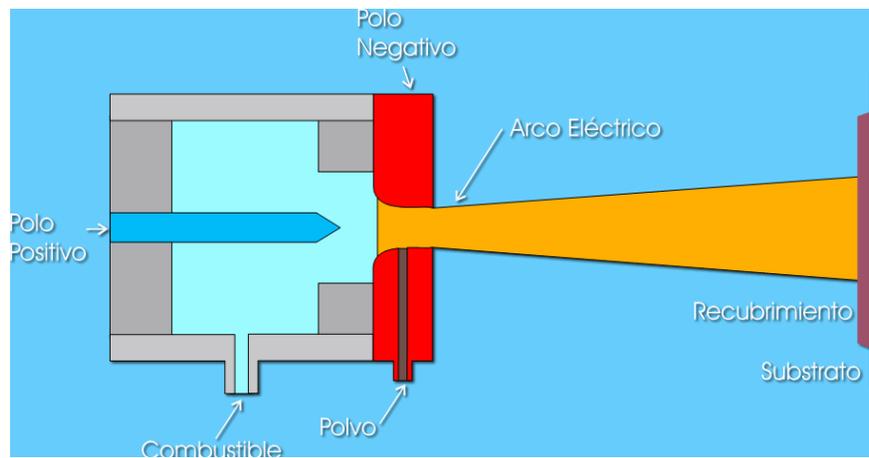


Figura 2.20 Rociado térmico por plasma.

Tomado de: Plasmatec Ingenieros C.A.

2.5.3. Rociado térmico por arco eléctrico (Twin Wire Arc Spray).

El rociado térmico por arco eléctrico por su sencillez se mantiene como una de las formas de proyección térmica más populares. Solo utiliza electricidad como fuente de calor para fundir los metales, a diferencia de otros procesos que utilizan gases de combustión. Con un número más bajo de parámetros de entrada que cualquier otro proceso de proyección térmica, los sistemas de proyección por arco eléctrico son fáciles de manejar y mantener, además de proporcionar resultados de recubrimiento muy fiables y resistentes.

En el proceso de rociado térmico por arco eléctrico el calentamiento y la fusión ocurren cuando dos alambres, que actúan como electrodos consumibles y generalmente son del mismo tipo de recubrimiento, son cargados eléctricamente con cargas opuestas (un alambre es positivo “ánodo”, el otro negativo “cátodo”) que se encuentran inicialmente aislados uno del otro, son alimentados conjuntamente y avanzan automáticamente para juntarse en un ángulo de aproximadamente de 30° grados, en una niebla de gas atomizante, donde una diferencia de potencial es aplicada a través de los alambres, iniciando un arco

eléctrico controlado en su intersección, que funde y pulveriza las puntas de los alambres que funcionan como electrodos. Un gas, usualmente aire, es comprimido y dirigido a través de la zona del arco, para atomizar el metal fundido y acelerar las partículas, a una velocidad de aproximadamente 150 m/s, que son depositadas sobre el sustrato previamente preparado, para asegurar una buena adherencia.

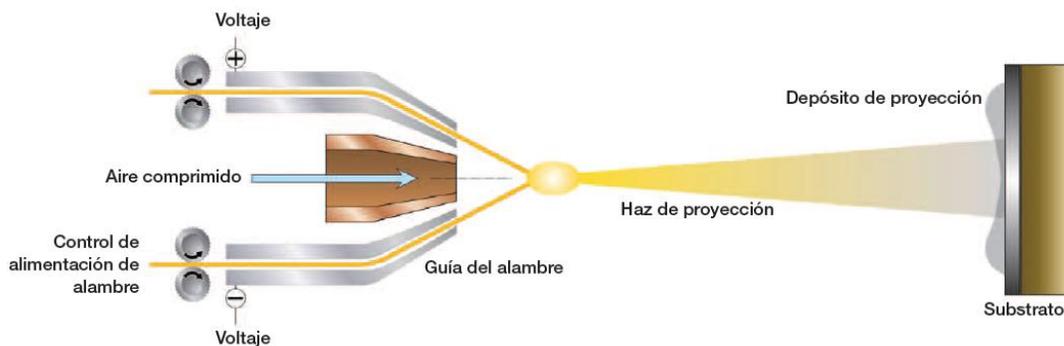


Figura 2.21 Esquema del proceso de rociado térmico por arco eléctrico.

Fuente: Sulzer Metco (2013).

Las variables del proceso que inciden directamente en la calidad del recubrimiento son:

- Voltaje. Se utilizan voltajes de entre 18 y 40 voltios.
- Velocidad de alimentación.
- Amperaje. Se utilizan amperajes de entre 200 y 400 amperios.
- Presión de aire. Se utiliza una presión de entre 500 y 700 KPa.
- Distancia de aplicación. Es de aproximadamente 110 a 130 mm

El voltaje de descarga es un parámetro de depósito de importancia en la calidad de un recubrimiento. Con el aumento del voltaje se logra disminuir la velocidad de las partículas y aumenta la temperatura del rociado, disminuyendo el tamaño de las mismas (Newbery, 2004). El tamaño de las partículas está

altamente relacionado con el voltaje del arco, lo cual se refleja igualmente en la microestructura. A bajos voltajes las partículas tienen forma esferoidal, y tienden a solidificar durante el trayecto hacia el sustrato.

La corriente tiene una influencia en la velocidad de las partículas. Una disminución en la corriente produce un aumento de la velocidad de las partículas, debido a la menor masa fundida para acelerar.

La presión juega un papel importante en la velocidad de las partículas ya que es el factor más importante para la velocidad y enfriamiento de las partículas. También, la presión de atomización puede aumentar o disminuir la temperatura de las partículas.

La distancia de proyección es otro de los parámetros importantes para determinar la microestructura y propiedades del recubrimiento. Influye en la adhesión, el espesor del recubrimiento, la fusión de las partículas, la forma de los “splats” y la formación de óxidos.

2.5.3.1. Componentes del sistema de rociado térmico por arco eléctrico.

Componentes Principales.

Los elementos principales necesarios para todas las soluciones de proyección por arco eléctrico, incluyen el material de recubrimiento que se ha de aplicar, el sistema de arrastre del alambre, la pistola de proyección de alambre por arco eléctrico que funde el material de recubrimiento y lo impulsa hacia la pieza de trabajo, un sistema que controla con precisión los requisitos de potencia eléctrica, presión de aire y velocidad de alambre, y finalmente una fuente de

alimentación para convertir la corriente alterna entrante en la corriente continua apropiada requerida por la pistola de proyección y el proceso de recubrimiento.

Componentes de manejo.

Aunque muchas aplicaciones de proyección de alambre por arco eléctrico emplean la manipulación manual de la pistola de rociado de modo muy satisfactorio, las aplicaciones automatizadas utilizan un sofisticado equipamiento de manejo que controla con precisión el movimiento de la pistola de proyección y la pieza de trabajo, y su posición relativa una respecto de otra. Entre los componentes de manejo se encuentran el controlador de manejo, también el manipulador de las piezas a recubrir y el manipulador de la pistola.

Componentes periféricos y auxiliares.

Una cabina insonorizada y un sistema de filtración y extracción de aire protegen tanto al personal como el entorno. Se requiere aire comprimido limpio para impulsar el material de recubrimiento fundido desde la pistola de proyección hacia la pieza de trabajo, así como para dar forma a la pluma de proyección con el fin de lograr la máxima eficacia. Para un control de proceso más avanzado, se utilizan distintos equipos para la monitorización y el diagnóstico del rociado térmico.

Componentes periféricos y auxiliares

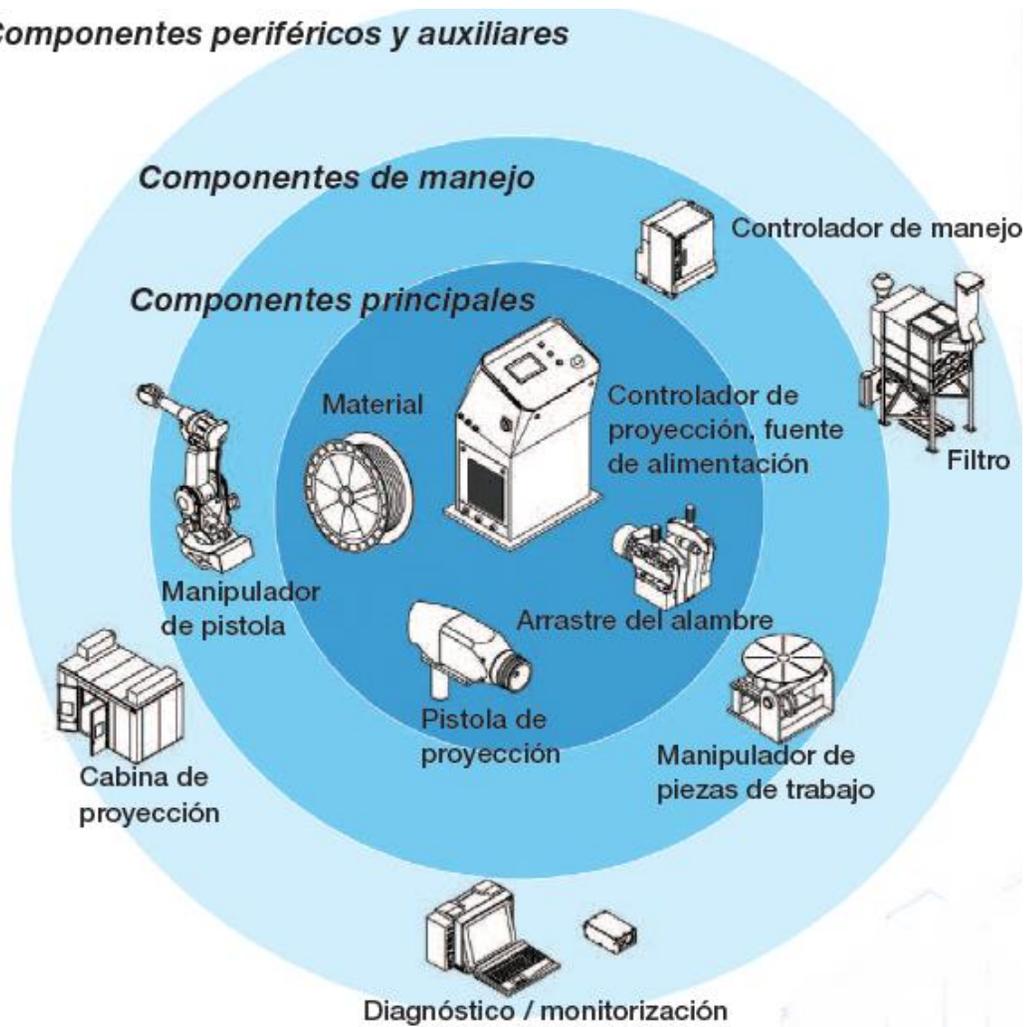


Figura 2.22 Componentes del sistema de rociado térmico por arco eléctrico.

Fuente: Sulzer Metco (2013).

2.5.3.2. Características de la deposición por Arco Eléctrico.

Las propiedades del recubrimiento están relacionadas principalmente con la microestructura de los mismos, así como de la interface entre el sustrato y la capa de recubrimiento.

Existen dos características del proceso de rociado térmico por arco que constituyen una desventaja en el momento de evaluar las propiedades del recubrimiento, estas son la presencia de óxidos debida al oxígeno del aire utilizado para la atomización de las partículas fundidas, y los poros presentes en la microestructura, que depende de la velocidad con que las partículas impactan en el sustrato y la atomización de las mismas.

Los recubrimientos por arco eléctrico suelen poseer una buena adherencia al sustrato ya que el anclaje mecánico produce valores de adherencia relativamente altos, del orden de 69 MPa.

Ventajas y desventajas.

Ventajas.

Técnicas:

- No transfiere calor al Sustrato por encima de 140°C, lo que evita cambios microestructurales y deformaciones el sustrato.
- Alta adherencia
- Permite la aplicación de recubrimientos delgados.
- Permite trabajar con sustratos no metálicos como plásticos, cerámicos o vidrio.
- Produce pocos gases contaminantes.
- Económicas
- Presenta un alto rendimiento energético.
- Muestra una tasa de deposición elevada en comparación con otros recubrimientos.
- Costos operaciones bajos.

- Permite depositar materiales de bajo costo resistentes a la corrosión, abrasión, erosión.

Operacionales:

- Amplio rango de parámetros de aplicación.
- El proceso no requiere agua o gases de proceso, excepto aire comprimido.
- Los sistemas son compactos, fáciles de trasladar y pueden ser autónomos.

Desventajas.

- Los recubrimientos tienen que ser conductores de electricidad.
- Presencia de óxidos y porosidades.
- Menor densidad de recubrimiento que otras técnicas (HVOF, Plasma, etc.).
- Posibles esfuerzos residuales.
- El material de deposición debe ser maleable para ser convertido en alambre.
- El proceso es ruidoso.
- Se requiere ventilación durante el termorociado debido a la cantidad de humo que se produce.

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

3.1. Investigación.

Para llevar a cabo este trabajo se realizaron diferentes tipos de investigación, las cuales ayudaron al desarrollo del mismo, estas investigaciones son:

3.1.1. Investigación Documental.

Es una investigación que se realiza en forma ordenada con objetivos precisos, con la finalidad de ser base a la construcción de conocimientos A través de esta investigación se procedió a la búsqueda y análisis de documentos, contenidos, recopilación de datos, etc., que nos llevarán a descubrir hechos y así podernos orientar a otras fuentes de investigación para poder realizar una investigación más completa e ir elaborando nuestras hipótesis.

En este aspecto, Arias, F. (2006), opina: La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimiento.

3.1.2. Investigación Experimental.

Es una investigación en la cual no sólo se identifican las características que se estudian sino que se controla, se alteran o manipulan, con el fin de observar los resultados al tiempo que procura evitar que otros factores intervengan en la misma.

También, para Arias, F. (2006), la investigación experimental “es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinar condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”.

Ahora bien, la investigación experimental consta de los siguientes pasos:

- Delimitar y definir el objeto de la investigación o problema: esto consiste en determinar claramente los objetivos del experimento y las preguntas que haya que responder.
- Diseño experimental: una vez conocido el problema, se debe analizar si la respuesta a nuestro problema va a ser la interpretación de una gráfica, un valor o una relación empírica; esto nos señalará el procedimiento experimental, es decir el orden a seguir al hacerlo. Luego se procede a diseñar el experimento.
- Realizar el experimento: una vez diseñado el experimento de prueba, se procede a realizar el experimento final, esto se reduce a llenar columnas, preparadas de antemano, con lecturas de las mediciones, a detectar cualquier inconveniente que se presente durante el desarrollo del experimento y a trazar las gráficas pertinentes o calcular el o los valores que darán respuesta al problema.
- Analizar los resultados.

3.2. Procedimientos y Actividades.

3.2.1. Investigación bibliográfica.

Se realiza una serie de consultas ya sea en libros, revistas, internet, trabajos de investigación, tesis previas y normas correspondientes referentes al tema.

3.2.2. Aprendizaje para el uso de la máquina de abrasión.

Es preciso conocer el procedimiento y métodos a seguir para el correcto funcionamiento del equipo evitando así errores de montaje y operación de la máquina durante el ensayo, que podrían generar como consecuencia resultados erróneos.

3.2.3. Adquisición de las pletinas de acero AISI1018.

Contactar con diferentes empresas proveedoras. Evaluar precio, tiempo de traslado, disponibilidad de cada una y compararlas entre ellas. Elección de la opción más favorable y proceder a su compra

3.2.4. Mecanizado de las probetas según la normas ASTM G-65.

Selección de la empresa metalmecánica capacitada para el procedimiento adecuado. Luego se procede a solicitar un presupuesto a cada empresa y se escoge el que más beneficie la operación. Seguidamente suministrar el material base y parámetros de maquinado según la norma.

3.2.5. Aplicación de los distintos recubrimientos sobre las probetas.

Para la realización de esta actividad se requerirá de los servicios de la empresa Plasmatec Ingenieros C.A. quienes utilizaran las técnicas de deposición adecuadas y establecidas para cada recubrimiento que se procederá a ensayar. Seguidamente las probetas termorociadas serán enviadas a rectificar con un acabado superficial de 0,8 μm .

3.2.6. Obtener los repuestos o materiales necesarios para ensayos.

Compra de arena, goma y cualquier otro repuesto o material de reposición que sea necesario para la realización adecuada de los ensayos de abrasión.

3.2.7. Verificar el estado de la máquina de abrasión y su calibración.

Comprobar el correcto funcionamiento de la máquina, de sus componentes, distintos mecanismos de control, materiales de reposición y lubricación. Configurar la calibración optima que garantizará la obtención de resultados confiables.

3.2.8. Realizar los ensayos de dureza Vickers.

Seleccionar una probeta por cada recubrimiento y proceder a realizar microindentación Vickers en secciones de la probeta que no interfieran con los resultados posteriores en el ensayo de abrasión.

3.2.9. Ejecución de los ensayos de abrasión.

Realizar primeramente limpieza de las probetas por ultrasonido. Proceder a pesar cada una de las probetas en una balanza electrónica con precisión de cuatro (4) decimales. Montaje de probetas y puesta en operación del equipo siguiendo los parámetros dictados en la norma AISI G65-B para un grupo de probetas. Asimismo se establecerán otros 2 grupos de probetas cumpliendo los mismos tiempos pero condiciones de carga diferentes establecidos para el objetivo de este proyecto. Luego de los ensayos realizar nuevamente limpieza para proceder al pesado post-ensayo de las probetas.

3.2.10. Realizar cortes transversales de las probetas.

Por cada recubrimiento y carga aplicada se realizara un corte transversal mediante una cortadora metalográfica a una probeta por grupo para medir la profundidad del desgaste y calcular el espesor aproximado del recubrimiento original y post-ensayo con Microscopía electrónica.

3.2.11. Determinar la densidad de los tres recubrimientos.

Se realizará mediante el método de inmersión, el cual consiste en determinar la diferencia de volumen producida por fragmentos de los recubrimientos, previamente pesados, al ser sumergidos en un cilindro graduado (o inyectora debidamente graduada) de 0.1 ml de precisión. Para la extracción de los fragmentos, una probeta por recubrimiento se someterá a compresión transversal en una prensa hidráulica para provocar desprendimiento parcial de la capa del recubrimiento. Seguidamente se harán los cálculos para determinar la densidad.

3.2.12. Realización de Microscopía Electrónica de Barrido.

Encomendar la realización de MEB para una selección de probetas cortadas transversalmente y preparadas metalográficamente por cada recubrimiento, para un análisis semicuantitativo químico puntuales una institución con la capacidad adecuada para llevarlas a cabo. Asimismo también se realizara MEB para otro grupo de probetas desgastadas de los tres recubrimientos por cada carga. Con este procedimiento se determinara el espesor de cada recubrimiento y se observarán los mecanismos de desgaste.

3.2.13. Tabulación, gráficas y organización de datos y resultados.

Para la mejor visualización y comparación entre los resultados de los recubrimientos y el material base, se organizan los resultados en tablas según parámetros y distintos puntos con sus correspondientes gráficas.

3.2.14. Análisis de Resultados y elaboración de conclusiones.

Una vez que se cuente con los resultados organizados y expresados de la mejor forma posible, se realiza un análisis de todo ello que facilitara la interpretación del lector y asimismo plantear una conclusión definitiva del proyecto. También se elaborara una comparación gráfica del perfil en la zona desgasta de cada recubrimiento por carga entre las mismas.

3.3. Diseño experimental aplicado.

Ya que el objetivo principal que se busca en este proyecto, también del interés de la empresa comprometida, es obtener resultados de resistencia a la abrasión para las condiciones más extremas, entonces se realizó el procedimiento más severo descrito en la norma, es decir, el procedimiento A. Una vez realizado

se comprobó que no todos los recubrimientos empleados en este trabajo resistieron el ensayo plenamente (el desgaste llegó hasta el sustrato), por lo que es necesario descender con los parámetros utilizando ahora el procedimiento B, que resultó en una resistencia de los tres recubrimientos bajo las mismas condiciones sin llegar al sustrato.

En la Tabla 3.5 se definen los diferentes parámetros para cada uno de los procedimientos de la prueba de Abrasión según la norma ASTM G-65.

Procedimiento	Fuerza contra la probeta		Pesos a colocar en la palanca de la máquina de abrasión (Kg)*	Revoluciones de la Rueda	Tiempo del ensayo (min)
	N	Lbf			
A	130	30	5,159	6000	30
B	130	30	5,159	2000	10
C	130	30	5,159	100	½
D	45	10.1	1,543	6000	30
E	130	30	5,159	1000	5

Tabla 3.1 Parámetros de la Prueba según la Norma ASTM G-65.

Fuente: Norma ASTM G-65 y Autores.

***Solo aplica para la máquina de abrasión de Pinto y Rangel ubicada en la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV.**

Una vez establecido el procedimiento a utilizar descrito en la norma, adicional a esto y para beneficio de la misma empresa, fueron realizadas pruebas de abrasión a otros niveles de carga por debajo de la establecida en el procedimiento B, a fin de desarrollar las curvas de tendencia por recubrimiento y comprobar que el nivel de desgaste sea proporcional a la carga. Es necesario

resaltar que a nivel industrial es relevante la variación de la carga y conocer el efecto que puede generar la misma cuando esto sucede.

Finalmente se empleó entonces un diseño factorial 3^3 que servirá para estudiar el efecto del nivel de la carga sobre la resistencia a la abrasión de cada recubrimiento. El parámetro Tiempo para los ensayos de abrasión es una constante que no cambia para este trabajo, sin embargo los niveles de carga son tres diferentes, en donde el de mayor carga está determinado por la norma ya mencionada, ASTM G65-B.

<u>Recubrimiento</u>	<u>Carga Baja</u> (30,35 N)	<u>Carga Media</u> (101,55 N)	<u>Carga Alta o</u> <u>por Norma (130</u> <u>N)</u>
Alpha Plus	3 Probetas	3 Probetas	3 Probetas
Alpha Plus + Acero Inoxidable 420	3 Probetas	3 Probetas	3 Probetas
Metco 8222 + Acero Inoxidable 420	3 Probetas	3 Probetas	3 Probetas

Tabla 3.2 Distribución de probetas según material y carga.

Fuente: Autores.

Adicionalmente podemos mencionar que fueron elaboradas algunas probetas adicionales que sirvieron a modo de reserva para pruebas de soporte de resistencia a la abrasión con altas cargas o reposición debido a ensayos mal realizados.

3.4. Material de las muestras.

3.4.1. Material Base o Sustrato.

El material de sustrato seleccionado fue un acero AISI 1018 el cual fue suministrado por la empresa Sumindu en forma de pletina. Para las pruebas de abrasión las muestras fueron cortadas de acuerdo con la norma ASTM G-65 (Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus), la cual recomienda una medida de 75 mm de largo, 25 mm de ancho y 6.35 mm de espesor.

3.4.2. Recubrimiento.

Para la aplicación de los recubrimientos se utilizaron tres tipos de recubrimientos diferentes:

- Una aleación base hierro-Boro (Fe_2B) llamada comercialmente ALPHA PLUS® compuesta de los siguientes elementos: Hierro (Fe), Boro (B), Cromo (Cr).

Detalles:

Al ser el ALPHA PLUS® una marca comercial registrada relativamente nueva en el mercado, Synthesarc Inc., propietarios del recubrimiento, mantiene como secreto comercial la composición química exacta de su recubrimiento. Sin embargo algunas de las características elementales que revela son las siguientes:

	Fe ₂ B	Cr
ALPHA PLUS	Base	>25%

Tabla 3.3 Composición química nominal Alpha Plus.

Fuente: Synthesarc Inc.

- Una combinación entre base hierro-Boro (ALPHA PLUS®) con Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico.

Detalles:

Para realizar esta técnica de termorociado en el que se usan dos materiales diferentes, el procedimiento consiste en que una de las puntas de la pistola es alimentada con el Alpha Plus y la otra punta de la pistola es alimentada con el Acero 420.

Ya mencionados los detalles del Alpha Plus en la sección anterior, procederemos a mencionar la composición del Acero Inoxidable 420 empleado:

	C	S	P	Si	Mn	Cr
AISI 420	≥ 0.15%	0.03% (Máx.)	0.04% (Máx.)	≤ 1%	≤ 1%	12-14 %

Tabla 3.4 Composición química nominal Acero Inoxidable 420.

Fuente: Sumindu S.A.

- una combinación entre un material base hierro compuesto principalmente de C, Cr, Ni y Si (conocido comercialmente como Metco 8222) y Acero Inoxidable 420 (13% Cr) martensítico.

Detalles:

Igual que en el caso anterior, la pistola de termorociado es alimentada por sus dos extremos con materiales diferentes que corresponden a Metco 8222 por un extremo y Acero Inoxidable 420 por el otro.

Se señala aquí entonces la composición química correspondiente al material Metco 8222:

	Fe	Cr	C	Mn	Otros (Máx.)
METCO 8222	Bal.	28%	5%	1%	1,5%

Tabla 3.5 Composición química nominal Metco 8222.

Fuente: Sulzer Metco (2013).

3.5. Procesos.

3.5.1. Fabricación de Probetas.

Las pletinas de acero fueron cortadas con segueta y luego maquinadas con un esmeril para eliminar la rebaba.

Para la realización del rociado térmico, las probetas fueron soldadas a una base (Tubería hueca con pletina de hierro), la cual permite la rotación de manera frontal ante la pistola de rociado, esta base fue suministrada por la empresa Plasmatec Ingenieros C.A.



Figura 3.1 Probetas montadas en la base.

Fuente: Autores.

3.5.2. Preparación de la superficie antes del proceso del rociado.

Para garantizar que el recubrimiento tenga una buena adherencia con el sustrato, es necesario realizar un procedimiento de limpieza superficial el cual consistió de las siguientes etapas:

La superficie de las muestras se limpió con un disolvente industrial comúnmente conocido como *Thinner*, con la finalidad de eliminar grasa, aceite, polvo, entre otros. Luego fueron precalentadas con una llama oxiacetilénica, durante un tiempo aproximado de 30 segundos para eliminar la humedad en la superficie que posteriormente se roció.

Con la finalidad de obtener mejor adherencia del recubrimiento al sustrato, se procedió a darle cierta rugosidad proyectando un abrasivo a presión de aire (60 psi) sobre la superficie de la probeta. Este abrasivo fue Alúmina (Al_2O_3) y fue aplicada minutos antes de la deposición para evitar cualquier contaminación de la superficie del sustrato u oxidación. Dicha rugosidad fue medida con un rugosímetro, obteniéndose valores promedios de rugosidad del

orden de $13,69 \pm 0,01$ micrones. Seguidamente se aplicó una capa de adherente sobre la superficie de las probetas, una aleación de Níquel y Aluminio.

3.5.3. Proceso de Rociado Térmico por Arco Eléctrico.

Se rociaron un total de 36 probetas que se distribuyeron de la siguiente forma:

	Cantidad Total
Alpha Plus	12 Probetas
Alpha Plus + Acero Inoxidable 420	12 Probetas
Metco 8222 + Acero Inoxidable 420	12 Probetas

Tabla 3.6 Cantidad de probetas según material.

Fuente: Autores.

Las probetas fueron colocadas de forma tal que el flujo del material a depositar impacte perpendicularmente a la superficie del sustrato hasta lograr un espesor de recubrimiento de 1,5 milímetros aproximadamente. Para lograr dicho espesor del recubrimiento y cumplir con los parámetros de temperatura adecuada del termorociado (Entre 70 °C y 120°C) fueron aplicadas pasadas de la pistola por intervalos cortos de tiempo en donde cada descanso fue realizado para medir la temperatura y comprobar que se estaba dentro del rango admisible, para evitar sobrecalentar el sustrato.



Figura 3.2 Proceso de Rociado Térmico.

Fuente: Autores.

	Alpha Plus	Alpha Plus + Acero Inoxidable 420	Metco 8222 + Acero Inoxidable 420
Diámetro del alambre (mm)	1,6	1,6	1,6
Voltaje (V)	26 - 28	26 - 28	26 - 28
Corriente del arco eléctrico (A)	180	196 - 200	218
Presión de atomización (kPa)	517,1069	603,2914	603,2914
Distancia de rociado (mm)	127	127	127
Temperatura de la probeta durante el proceso (°C)	70 - 120	70 - 120	70 - 120

Tabla 3.7 Parámetros del termorociado por arco eléctrico.

Fuente: Autores.

3.5.4. Rectificado.

Con el fin de obtener un acabado superficial acorde a las normas para los ensayos posteriores, las probetas se rectificaron hasta alcanzar una rugosidad superficial de 0,8 micrómetros aproximadamente según lo indicado en la norma ASTM G65 correspondiente al ensayo de abrasión. Este procedimiento fue realizado en el Taller de Precisión JV, C.A.

3.6. Ensayo de abrasión.

3.6.1. Máquina de ensayos de abrasión.

El equipo que se utilizó para realizar el ensayo de abrasión es el que se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el mismo fue diseñado y construido en 1999 por Nicolas Pinto y Aldrin Rangel bajo las norma ASTM G-65 (Máquina de Ensayo de Abrasión.).

La máquina está compuesta por una rueda de goma que gira bajo carga a 200 ± 10 rpm, la cual es impulsada por un motor reductor DC de 1hp, mientras un flujo de arena abrasiva es introducido entre la probeta y la rueda. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve en la dirección del flujo de la arena. La máquina posee un temporizador el cual permite apagarla de manera automática después de un tiempo seleccionado.



Figura 3.3 Máquina de Ensayo de Abrasión.

Fuente: Autores.

3.6.2. Limpiador por Ultrasonido.

Se realizó un procedimiento de limpieza inicial de cada probeta por ultrasonido en un limpiador electrónico digital modelo CD-4800 (Figura 3.4). El solvente a utilizar fue *Thinner*. Se preparó el limpiador ultrasónico y se seleccionó un matraz de dimensión suficiente para la probeta, este matraz fue introducido en el limpiador que contiene agua de forma que rodea al matraz. Se introdujeron las probetas una por una y se asignó un tiempo de 280 s.



Figura 3.4 Limpiador electrónico por ultrasonido.

Fuente: Autores.

Posteriormente se extrae la probeta y se limpia con un paño de algodón para quitarle el residuo de partículas. Se secan con un secador de aire caliente y se dejaron enfriar a hasta alcanzar la temperatura ambiente.

3.6.3. Balanza.

Se utilizó una balanza marca Ainsworth AA160 (Figura 3.5), para medir la masa de cada una de las probetas antes y después del ensayo de abrasión, la misma posee una apreciación de 0.0001 g, lo que cumple con lo indicado por la norma del ensayo de abrasión.



Figura 3.5 Balanza Ainsworth AA160 con apreciación de 0.0001 g.

Fuente: Autores.

3.6.4. Abrasivo.

El abrasivo utilizado es una arena de cuarzo redondeado según American Foundry Sand N° AFS 50-70. La dureza de la arena de sílice es de 840 HV. La misma debe poseer, según la norma, un contenido de humedad que no debe de exceder el 0,5% del porcentaje de su peso.

Para la realización del ensayo de abrasión será requerido que la rata de flujo de arena se de 300 a 400gr/min., esto es especificado por la norma.

3.6.5. Rueda de caucho.

La rueda está compuesta con un disco de acero AISI 1040 como base, en su periferia se encuentra moldeada la rueda de caucho de Clorobutilo con 0,5 in de espesor (12,7 mm.). Esta rueda fue reencauchada en la empresa GOMAINCA

situada en Barquisimeto Edo. Lara. La composición de la rueda está indicada en la Tabla 3.8.

<u>Materiales</u>	<u>Proporción por peso</u>
Chlorobutyl N° HT 10-66	100
Agerite Staylite - S	1
HAF Black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

Tabla 3.8 Composición del Recubrimiento de Goma

Fuente: Norma ASTM G-65.

3.6.6. Procedimiento General.

1- Se le realizó una limpieza a las probetas con *Thinner* en el limpiador ultrasónico con el fin de remover todas aquellas impurezas y/o grasas que se encontraban en la superficie y luego se secaron.

2- Se pesaron las probetas en la balanza electrónica.

3- Se verificó que el disco estuviera girando a 200 r.p.m. aprox. con ayuda de un tacómetro digital.

4- Se revisó que la rata de flujo de arena a través de la tobera estuviera entre 300 gr/min (0,66 lb/min) y 400 gr/min. (0,88 lb/min).

5- Se colocó la probeta cuidadosamente en el soporte y se añadieron los pesos apropiados a la palanca para así desarrollar la fuerza apropiada presionando la probeta contra la rueda.

6- Se colocó el temporizador en el tiempo requerido.

7- Se encendió la máquina e inmediatamente después se bajó la palanca para poder permitir el contacto entre la probeta y la rueda.

8- Al finalizar el tiempo del ensayo se separó la probeta de la rueda, se detuvo el flujo de arena y la rotación de la rueda.

9- Luego se desmontó la probeta, se volvió a limpiar para luego pesarla nuevamente.

El tiempo de descanso entre las pruebas fue el necesario para que la rueda de goma vuelva a temperatura ambiente.

3.6.7. Pérdida Volumétrica.

Los resultados del ensayo de abrasión serán reportados como pérdida de volumen en milímetros cúbicos según lo especificado en la norma, de esta manera, no existe confusión causada por variaciones en la densidad. Se debe convertir de pérdida de masa a pérdida de volumen, de la siguiente manera:

$$\mathbf{Volumen}_{perdido}(mm^3) = \frac{\mathbf{masa}_{perdida}(gr)}{\mathbf{densidad}(\frac{gr}{m^3})} * \mathbf{1000} \quad \mathbf{Ec. 3.1}$$

La cantidad de material perdido por abrasión en el ensayo debe ajustarse según la disminución del diámetro de la rueda de goma. El valor de pérdida de volumen ajustada (Adjusting the Volume Loss, AVL) toma en cuenta la pérdida de volumen y la tasa de abrasión real que se produciría por una rueda de diámetro de 228,6 mm. (9,00pulg.).

$$\mathbf{AVL} = \mathbf{Volumen}_{perdido}(mm^3) * \frac{\mathbf{228,6mm(9,00\ pulg)}}{\mathbf{Diam.ruedadespuésdeusar(mm)}} \quad \mathbf{Ec. 3.2}$$

3.7. Ensayo de Dureza por Microindentación.

En el ensayo de Microindentación Vickers, las probetas fueron cortadas en una cortadora metalográfica marca BUEHLER de motor eléctrico (Figura 3.6) para cortes con discos de diamante. Luego se le realizó la preparación metalográfica según lo expuesto en la norma ASTM E3-11 (Standar Guide for Preparation of Metallographic Specimens) haciendo uso de una pulidora marca BUEHLER MetaServ 3000 (Figura 3.7).



Figura 3.6 Cortadora Metalográfica.

Fuente: Autores.

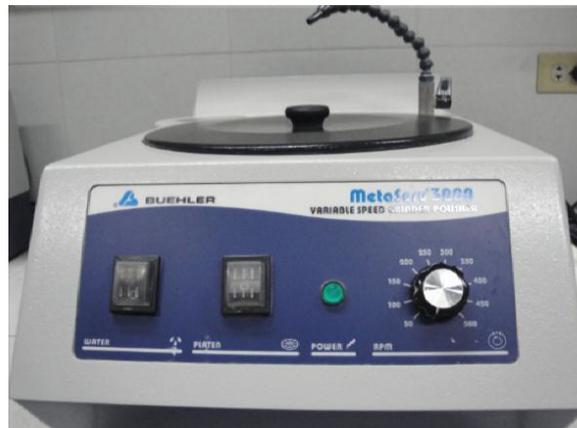


Figura 3.7 Pulidora.

Fuente: Autores.

Se le realizaron ensayos de microdureza tanto en la superficie de la probeta (recubrimiento), como en la sección transversal (recubrimiento – sustrato).

El equipo utilizado fue un microdurómetro marca BUEHLER LAKE BLUFF modelo N° 1105 ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Figura 3.8).



Figura 3.8 Microdurómetro.

Fuente: Autores.

Las mediciones de microdureza se efectuaron según la norma ASTM E92-82 (Vickers Hardness of Metallic Materials), utilizando un indentador Vickers y una carga de 300g, con un tiempo de carga de 15 segundos. El valor reportado de la microdureza fue el promedio de 12 mediciones, realizadas perpendiculares a la superficie cortada de las probetas de cada recubrimiento, y para la superficie del recubrimiento el valor reportado fue el promedio de 9 mediciones igualmente para cada recubrimiento.

El procedimiento para hallar la microdureza Vickers en el durómetro marca BUEHLER ubicado en la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV es el siguiente:

1. Encender el equipo.
2. Fijar el valor de carga.
3. Fijar el tiempo de indentación a emplear.
4. Verificar que el LED este sobre HV (Hardness Vickers).
5. Verificar que ambas líneas en el visor estén una sobre la otra, es decir, una sola línea, y luego entonces pulsar el botón “zero” para calibrar la medición de diagonales.
6. Bajar suficiente la prensa con la manivela para evitar tropiezos con los dados o visores al girarse en el siguiente paso.
7. Pulsar “10x” para activar el visor de menor aumento.
8. Fijar correctamente la pieza en la prensa o de no fijarse colocar sobre la misma de manera que el indentador siempre tendrá como soporte inferior, bajo la pieza, la prensa. De no ser así el indentador podría realizar el ensayo con la pieza sin soporte y quedaría “en el aire”.
9. Fije el medidor de diagonal (el principal) en el centro o sobre la última indentación (dado el caso) justo antes de ubicar el próximo punto a ensayar.
10. Enfocar la pieza subiendo o bajando la manivela.
11. Graduar la luz que mejor se adecue a la vista.
12. Usar el mismo ojo y la misma persona siempre para una misma muestra.
13. Mover los controles de la prensa para desplazarse por la probeta y elegir un punto a perforar utilizando como guía el medidor de diagonales. Tratar de seleccionar un punto limpio en la muestra, es decir, una zona blanca que no muestre porosidad o grietas.
14. Cuando esté listo, pulse el botón “Start” para realizar la indentación.

15. Una vez perforada, cuando se posicione el visor en “40x”, dar vueltas a la manivela para enfocar la muestra. Gradúe la intensidad de luz de ser necesario para visualizar mejor la huella.
16. Medir la diagonal horizontal moviendo los controles del visor y NO los de la prensa. Pulse el botón “Read” para entrar el valor.
17. Medir la diagonal vertical. Pulse el botón “Read” para entrar el valor.
18. Tomar nota de la dureza que se registra.
19. Antes de realizar la próxima indentación, DEBE BAJAR LA PRENSA con la manivela al menos 4 vueltas, para evitar que choque el indentador con la muestra.
20. Repetir desde el paso número 5 para realizar la próxima indentación.

3.8. Calculo de la densidad.

El método utilizado para poder calcular la densidad de los recubrimientos fue el método de Inmersión. Para el mismo, se sometió una probeta por recubrimiento a compresión (utilizando una prensa hidráulica) por su lado más corto de manera que el recubrimiento se desprende del sustrato en pequeños trozos.

Estos fragmentos se pesaron en la balanza electrónica para conocer su masa y luego fueron introducidos en una inyectadora graduada de 3 ml con precisión de 0,1 ml, llena parcialmente de agua. Una vez dentro se observó cuanto se desplazó el agua que significa el volumen que ocupa estos fragmentos.

Se sabe entonces que:

$$\rho = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}} \qquad \text{Ec. 3.3}$$

3.9. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Se hizo uso de un microscopio marca HITACHI S-2400 (Figura 3.9), ubicado en la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV, con un voltaje de aceleración de 20Kv, acoplado a un equipo de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X con la capacidad para realizar microanálisis semicuantitativo. Para cada muestra se tomaron imágenes a diferentes magnificaciones sobre una superficie previamente preparada metalográficamente.



Figura 3.9 Microscopio Electrónico de Barrido.

Fuente: Autores.

Las muestras seleccionadas para realizar la MEB fueron tres de sección transversal, una por cada recubrimiento, y otro grupo de tres probetas por nivel de carga (estas tres mencionadas es por cada recubrimiento igualmente): tres de carga baja, tres de carga media y tres de carga alta. Adicionalmente se realizó el análisis elemental por medio de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS),

a tres fragmentos de alambre correspondientes a cada recubrimiento diferente, es decir, uno de Alpha Plus, uno de Metco 8222 y uno de Acero Inoxidable 420, para corroborar con las composiciones nominales teóricas que proveen los fabricantes e identificar las que se desconocen.

Se obtuvo los datos de la superficie de desgaste y sección transversal de las probetas. Paralelamente, se evaluó la composición elemental de las piezas mediante el microanálisis semicuantitativo realizado por el equipo de EDS acoplado al microscopio.

CAPITULO IV

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

4.1. Macroestructura y composición química elemental.

Las siguientes imágenes, obtenidas mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), corresponden a la sección transversal de los tres recubrimientos estudiados. En ellas se logra observar de forma clara la macroestructura y el espesor de los recubrimientos. Así como una aproximación a la composición química de los recubrimientos a través de la espectroscopia de rayos X (EDS)

4.1.1. Alpha Plus.

En la figura 4.1, correspondiente al Alpha-Plus, se observa una macroestructura heterogénea y cohesionada, con una alta presencia de porosidades, de distinta morfología, tamaño y tipo. Ésta elevada cantidad de porosidades es una característica típica de los recubrimientos depositados mediante rociado térmico por arco eléctrico, tal y como fue observado también por (Cermeño & Ruiz, 2006) y (Burgos C., 2002). La presencia de porosidades en un recubrimiento es algo generalmente perjudicial, ya que disminuye la resistencia al desgaste, sin embargo en ciertos procesos es beneficiosa, como por ejemplo en elementos de máquinas que necesiten ser lubricados, ya que los poros cumplen el trabajo de absorber o retener cierta cantidad de lubricante y de esta manera existe una mejor y más eficiente lubricación (Ernest & Faublack, 2012).

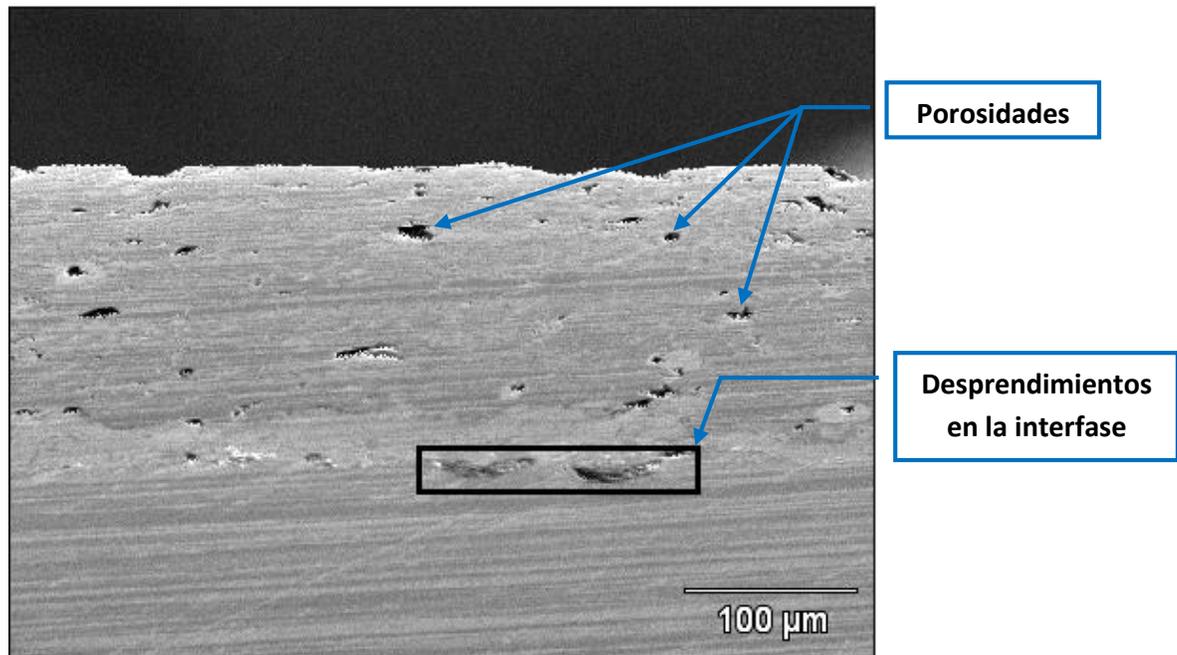


Figura 4.1 Sección Transversal. Alpha-Plus a 100x.

En la interfase, se observa una buena adhesión del recubrimiento con la capa de adherencia, y así mismo de ésta con el sustrato, sin presencia de grietas en la zona. Como desperfecto (ver figura 4.1) se puede apreciar que existen algunos desprendimientos en la interfase debido a las inclusiones de alúmina que quedan como residuo del proceso de granallado en el sustrato, el cual es un proceso previo al rociado térmico, y que se desprenden al momento de realizar la preparación metalográfica de las muestras, lo cual también fue observado por Guzmán & Pardi (2011).

En la figura 4.2, se puede ver con mayor detalle la interfase, se aprecia como el recubrimiento y la capa de adherencia se unen, beneficiando la adhesión mecánica del recubrimiento con el sustrato, esto también fue observado por Burgos (2002). Además se pueden apreciar las diferencias entre las distintas capas que conforman la probeta.

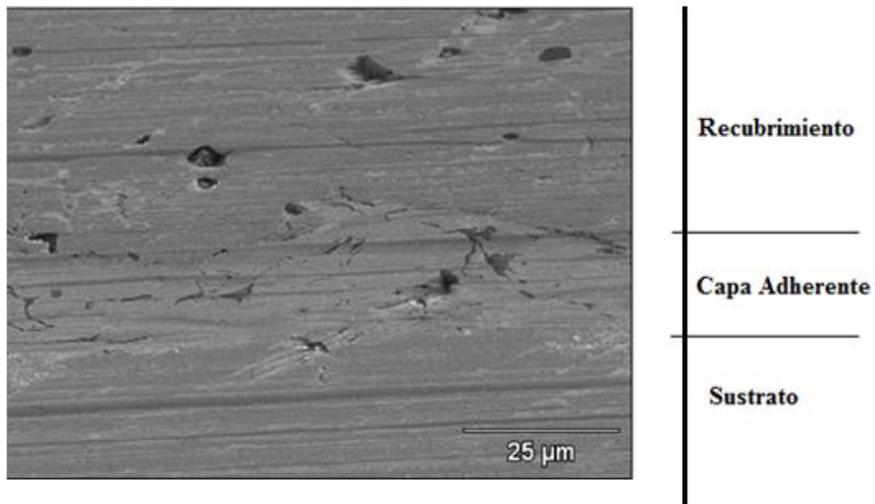


Figura 4.2 Sección Transversal. Alpha-Plus a 500x.

En la figura 4.3, se observan las zonas donde se estudió la composición química para esta fotografía de la muestra y las gráficas del análisis químico correspondiente. La **Zona 1** (Superior) corresponde al recubrimiento, la **Zona 2** (Intermedia) pertenece a la interfase (capa adherente) y la **Zona 3** (Inferior) al sustrato.

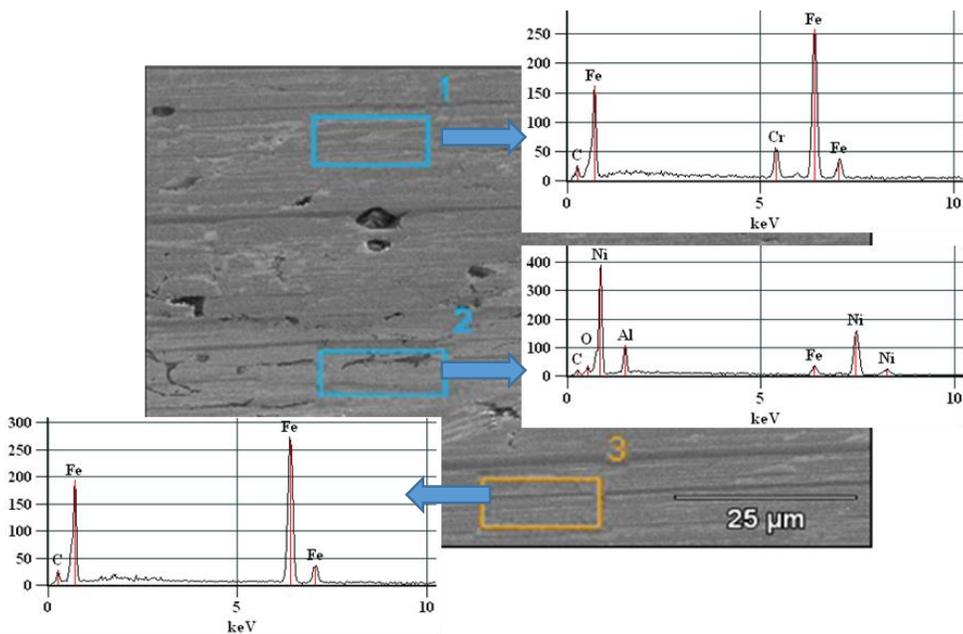


Figura 4.3 Sección Transversal probeta con Alpha Plus a 500x.

Zona de análisis químico (EDS).

La tabla 4.1, muestra los resultados del análisis químico puntual para la probeta correspondiente al Alpha Plus.

% Peso

	C-K	O-K	Al-K	Cr-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1	-----			8.00	79.57	
Zona 2	-----	-----	6.97		6.44	66.28
Zona 3	-----				87.32	

% Atómico

	C-K	O-K	Al-K	Cr-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1	-----			5.89	54.51	
Zona 2	-----	-----	8.29		3.70	36.23
Zona 3	-----				59.69	

**Tabla 4.1 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico.
Alpha Plus.**

Para el recubrimiento (**Zona 1**) se determinó que los elementos principales presentes son hierro, cromo, carbono. La cual es una composición similar a la referida por el fabricante. En el análisis no se pudo observar la presencia de boro en el recubrimiento, porque al ser éste un elemento liviano se dificulta su detección por la técnica de análisis empleada (EDS) (Ingemarsson, 2011).

La interfase (**Zona 2**) está compuesta principalmente por aluminio y níquel, tal cual lo especificó la empresa Plasmatec Ingenieros. Se observaron otros elementos, como Hierro y Carbono, que forman parte del recubrimiento y que al impactar durante la deposición se mezclan con la interfase. La presencia

de oxígeno es debida a la formación de óxidos durante el proceso de deposición del recubrimiento.

El sustrato (**Zona 3**) está compuesto de hierro y carbono, composición típica del acero 1018, usado como material base.

Es necesario aclarar que en el microscopio empleado para observar estas muestras, la cuantificación de elementos por EDS del Carbono y Oxígeno no puede ser realizada con exactitud, pero si pueden ser detectados, de otra forma, el Boro no es detectable en ese microscopio.

El espesor del recubrimiento se determinó con la ayuda del software utilizado durante la microscopía electrónica de barrido, obteniéndose un valor de 928.07 μm , como se observa en la figura 4.4. Esta es una de las ventajas de la deposición por arco eléctrico, que permite obtener recubrimientos de un espesor considerable con una buena cohesión.

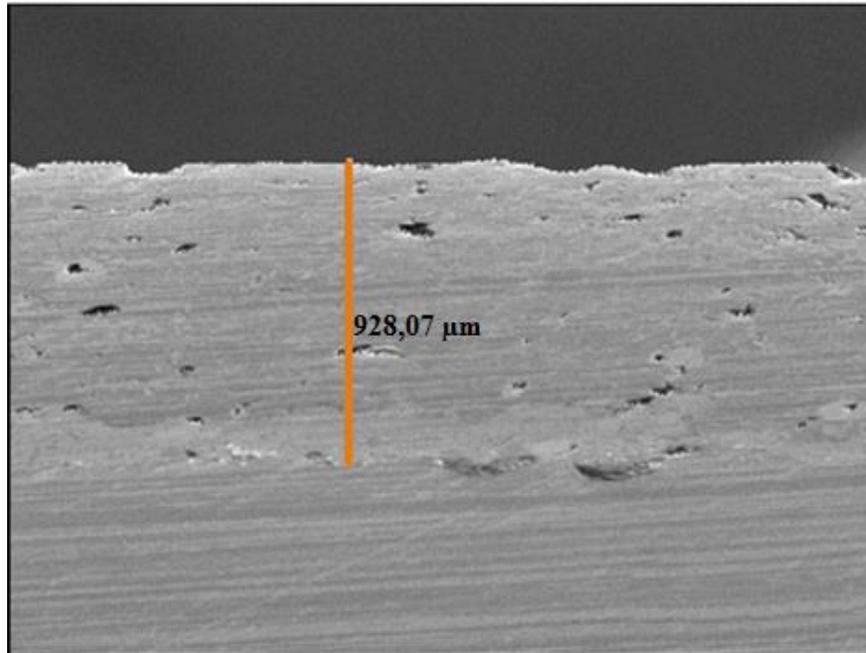


Figura 4.4 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Alpha Plus.

4.1.2. Alpha Plus + Acero Inoxidable 420.

La macroestructura del Alpha Plus + Acero Inoxidable 420, se observa en la figura 4.5, al igual que el Alpha Plus el recubrimiento se muestra cohesionado y compacto, con presencia de heterogeneidades distribuidas uniformemente por toda la sección transversal. Entre ellas se observan porosidades de distintas formas y tamaños. También se observa una superficie regular con pequeños surcos debidos al rectificado.

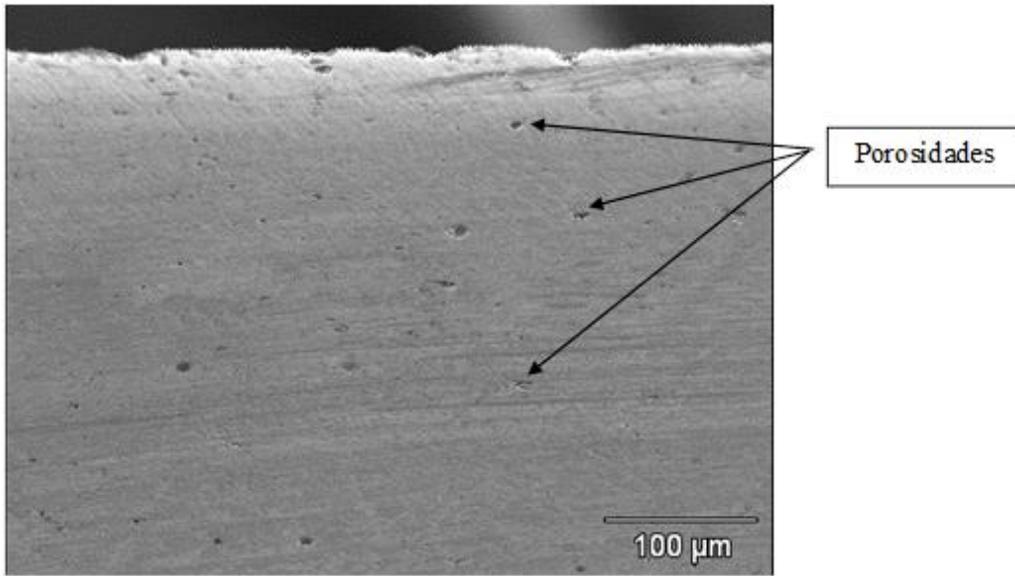


Figura 4.5 Sección Transversal Alpha Plus+420 a 100x.

En la figura 4.6, se muestra la excelente adhesión del recubrimiento con el sustrato, queda en evidencia que el recubrimiento, al igual que sucede en el caso del Alpha Plus, se entremezcla con la capa adherente mejorando la adhesión mecánica. En la zona inferior de la capa adherente se observan unas partículas de alúmina remanentes del proceso de granallado previo al proceso de termorociado. Las zonas más oscuras son principalmente trazas de aluminio sobre la matriz de níquel.

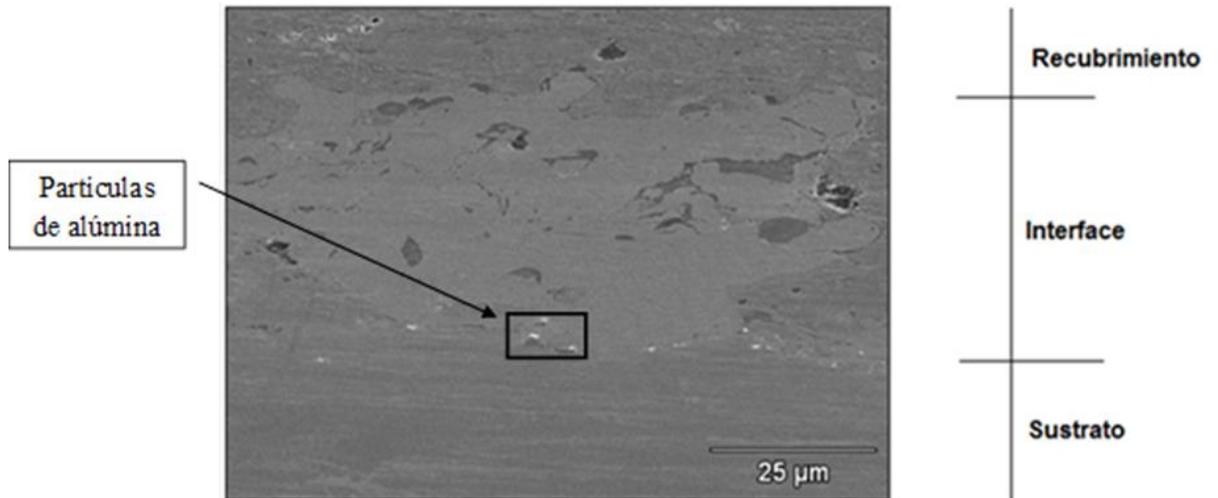


Figura 4.6 Sección Transversal Alpha Plus+420 a 500x

Las zonas donde se analizó la composición química para esta fotografía y las gráficas de los resultados se muestran en la figura 4.7.

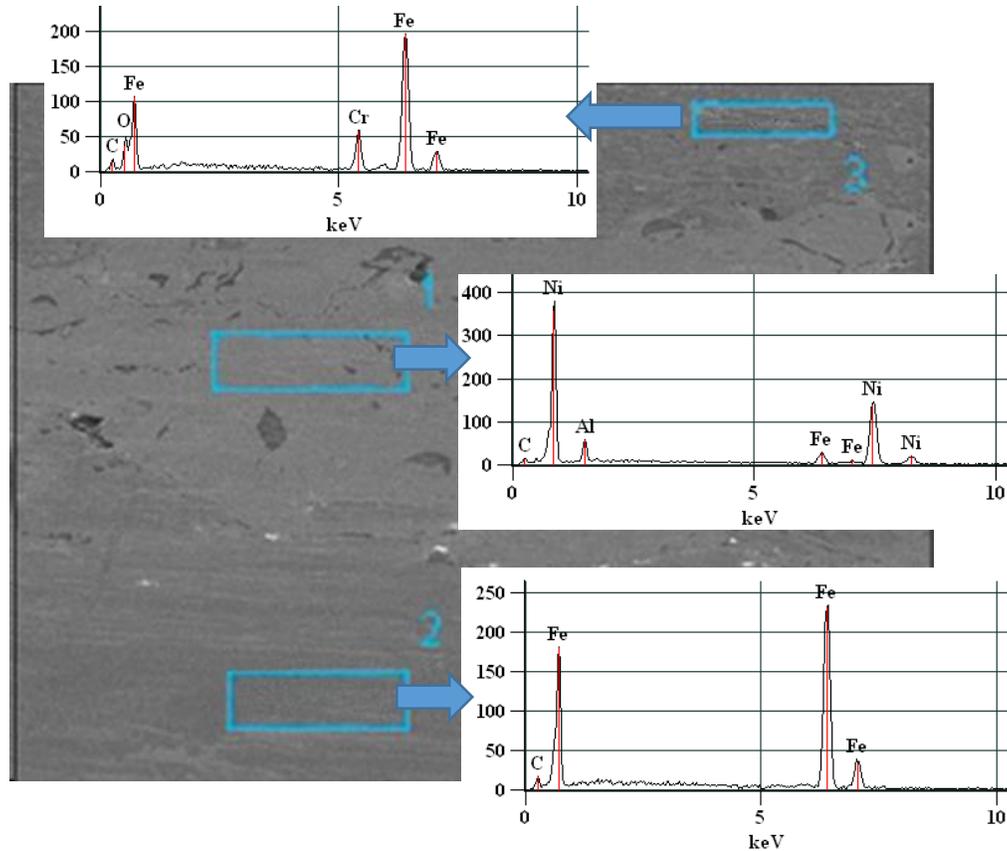


Figura 4.7 Sección Transversal. Alpha-Plus a 100x.

La Zona 1 (intermedia) corresponde al sustrato siendo una aleación de aluminio y níquel principalmente. La Zona 2 (Inferior), pertenece al sustrato ya que se revela la composición del acero 1018 utilizado como base. La zona 3 (superior), corresponde al recubrimiento, cuya composición está compuesta principalmente por hierro y cromo. En la tabla 4.2, se muestran las tablas que señalan porcentualmente la composición química de las zonas analizadas, tanto en porcentaje peso como en porcentaje atómico.

a) % Peso

	C-K	O-K	Al-K	K-K	Cr-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1	-----		4.33			6.95	77.41
Zona 2	-----					91.16	
Zona 3	-----	-----			10.09	78.77	

b) %Atómico

	C-K	O-K	Al-K	K-K	Cr-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1	-----		6.31			4.89	51.80
Zona 2	-----					68.94	
Zona 3	-----	-----			7.88	57.25	

Tabla 4.2 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico.

Alpha Plus + 420.

El espesor de recubrimiento arrojó un valor de 1117.9 μm , esto fue calculado con el uso del software utilizado durante la microscopía electrónica de barrido.

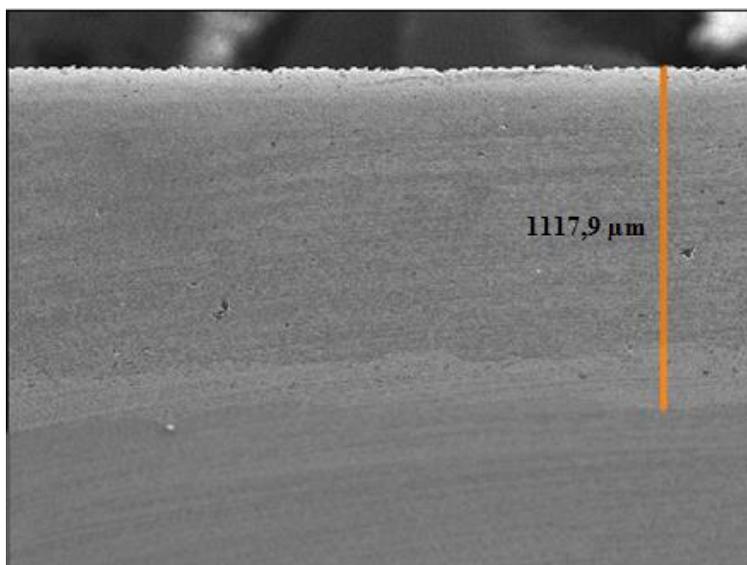


Figura 4.8 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Alpha Plus + 420 a 100x.

4.1.3. Metco 8222 + 420.

En la figura 4.9, perteneciente a la sección transversal del Metco 8222 + 420, se puede notar una macroestructura cohesionada y heterogénea, que indican una correcta deposición del recubrimiento. La superficie de la probeta es regular con surcos provenientes del proceso de rectificado. También se presentan una alta cantidad de porosidades de forma similar a lo observado en los recubrimientos Alpha Plus y Alpha Plus + 420, éstas son originadas por el apilamiento incorrecto de los “splats” y son características del proceso de deposición por arco eléctrico.

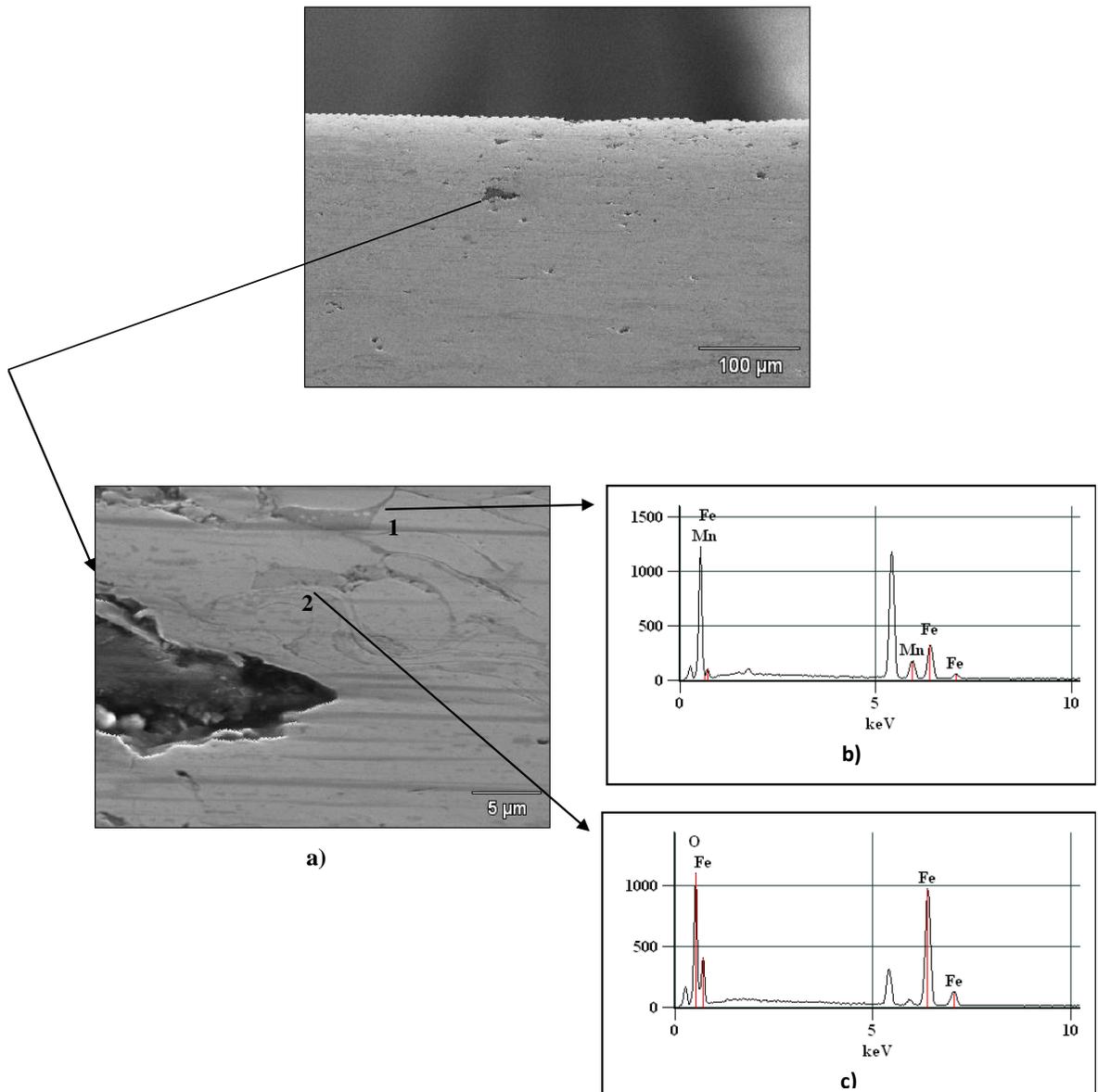


Figura 4.9 Sección Transversal. Metco 8222 + 420. (fotografía superior a 100x) a) Detalle Porosidad a 1500x. b) Análisis Químico de partícula no fundida. c) Análisis Químico de partícula de óxido.

Asimismo se observa una sección del recubrimiento a 1500x en el cual es posible apreciar detalladamente una porosidad que se trata de una cavidad con morfología irregular formada durante el termorociado. Además, es posible percibir la estructura lamelar del recubrimiento, típica de los recubrimientos

aplicados por rociado térmico. El análisis químico (Figura 4.9b y 4.9c), revela la presencia de partículas no fundidas (partícula 1), que no lograron alcanzar la temperatura necesaria para fundir completamente, y de óxidos (partícula 2), formados durante el proceso de deposición por el contacto de las partículas fundidas con el aire. Los óxidos en los recubrimientos pueden ser perjudiciales frente a la corrosión, los esfuerzos y al maquinado, pero a su vez beneficiosos si se requiere un recubrimiento resistente al desgaste y con altas durezas (Burgos, 2002).

La figura 4.10, muestra la adhesión del recubrimiento con el sustrato por intermedio de la capa adherente, se observa una zona muy bien cohesionada, sin presencia de grietas que atenten contra la integridad del recubrimiento.

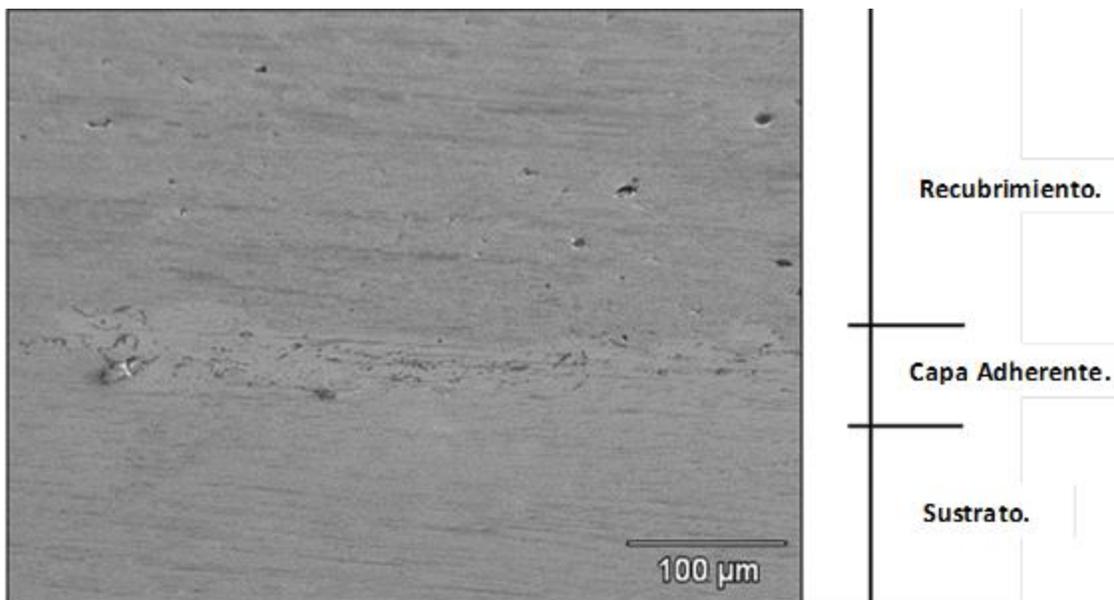
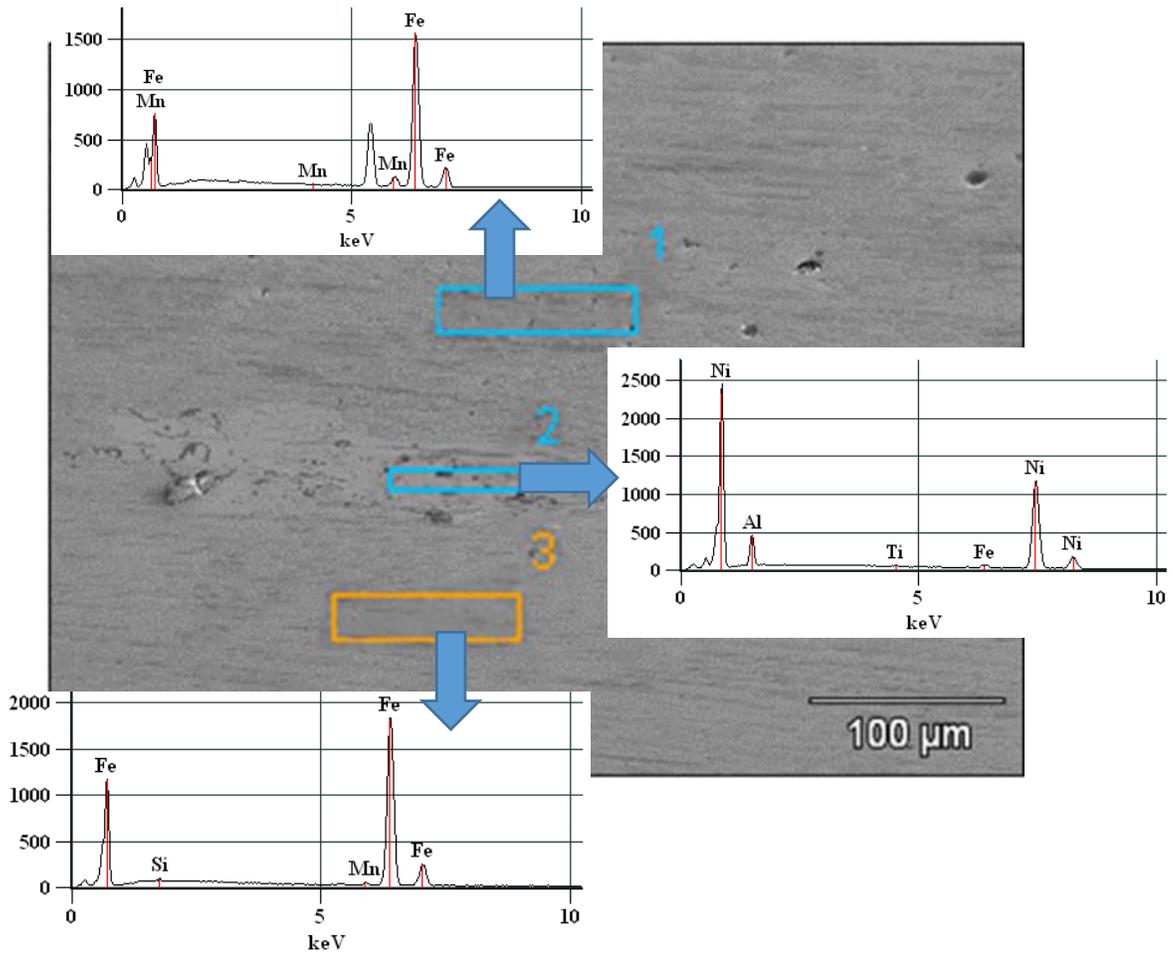


Figura 4.10 Sección Transversal. Metco 8222 + 420 a 100x.

El análisis químico realizado en las zonas indicadas en la figura 4.11, muestra la composición química de las distintas partes de la muestra.



**Figura 4.11 Sección Transversal Metco 8222 + 420 a 500x.
Zonas de análisis químico (EDS).**

En la zona 1 (Superior) perteneciente al recubrimiento, se observa la presencia principalmente de Hierro, Manganeso y Cromo, que son los componentes del recubrimiento según lo indicado por el fabricante. La zona 2 (Intermedia), comprende el análisis de la capa adherente, constituida por una aleación de Níquel y Aluminio, de igual forma que en los recubrimientos anteriores. Finalmente, la zona 3, pertenece al análisis realizado sobre el sustrato, se observa que se trata de la composición química de un acero, aunque el carbono

no aparece debido a que se suprimió del estudio porque no es posible realizar su cuantificación con precisión por ser un elemento ligero.

En la tabla 4.3, se observan las tablas con las composiciones en porcentaje peso y en porcentaje atómico de las mencionadas tres zonas de estudio químico en este recubrimiento.

a) % Peso

	Al-K	Si-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1				19.12	0.17	80.71	
Zona 2	8.40		0.52			1.75	89.32
Zona 3		0.43			0.79	98.78	

b) % Atómico

	Al-K	Si-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-L
Zona 1				20.25	0.17	79.58	
Zona 2	16.61		0.58			1.67	81.14
Zona 3		0.86			0.80	98.34	

Tabla 4.3 Resultados del análisis por EDS, en a) % peso y b) % atómico.

Metco 8222 + 420.

El espesor obtenido mediante el software utilizado durante la microscopía electrónica de barrido fue de 883.16 μm , esta medida toma en cuenta el espesor de la capa adherente.

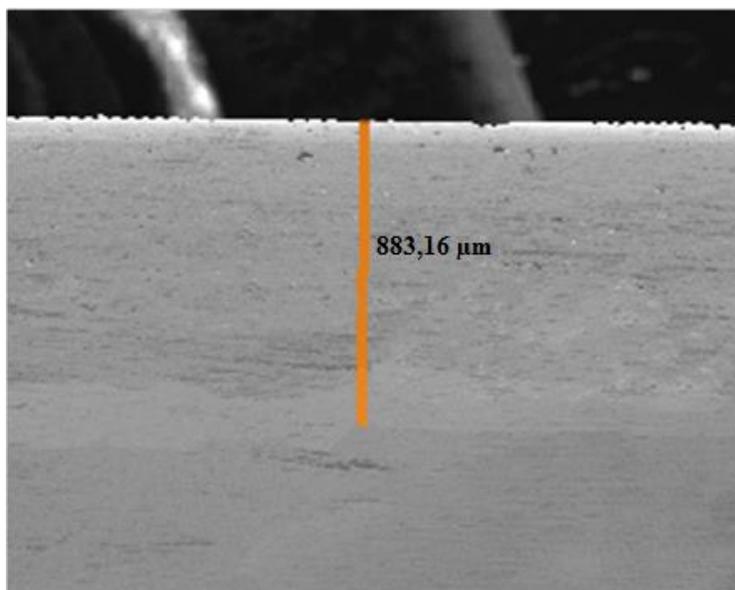


Figura 4.12 Cálculo de espesor de recubrimiento. Sección transversal Metco 8222 Plus + 420 a 20x.

4.2. Determinación de la densidad.

La densidad de los tres recubrimientos fue determinada utilizando el método de inmersión, como se describe en el procedimiento experimental.

Recubrimiento	Densidad (gr/ml)	Consulta Bibliográfica
Alpha Plus	6,77	6,66
Alpha Plus + 420	7,53	-
Metco 8222 + 420	5,95	-

Tabla 4.4. Densidad de los recubrimientos.

El valor de densidad del Alpha Plus es similar al consultado en la hoja técnica del fabricante. Para los otros recubrimientos no se encontró información sobre la densidad para poder compararlos, ya que son mezclas de dos recubrimientos.

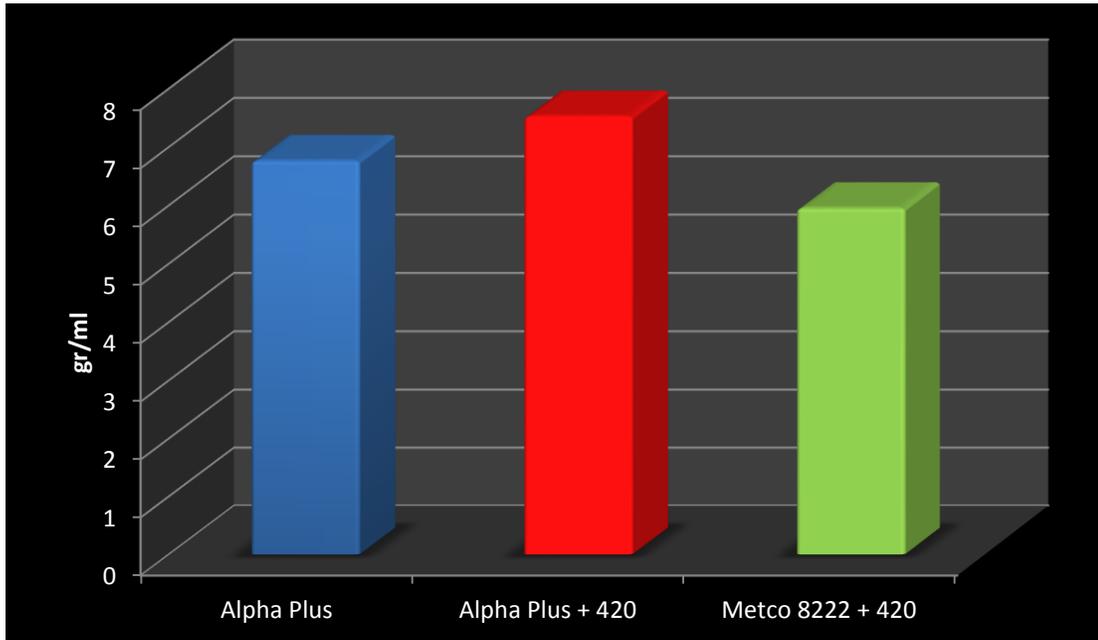


Figura 4.13 Densidad de los recubrimientos.

En el estudio no se observó una relación entre densidad y resistencia al desgaste, por cuanto el más resistente de los tres, Alpha Plus, arrojó una densidad menor al Alpha Plus + 420, pero superior al Metco 8222 + 420.

4.3. Análisis del Ensayo de Microdureza.

Los resultados de los ensayos de microdureza Vickers, fueron realizados en la cara transversal y superficial de las probetas. Los valores de dureza son el promedio de las nueve indentaciones realizadas en cada una de las mencionadas caras. Los resultados se muestran en las siguientes figuras y tablas.

En la figura 4.14, se observa que el recubrimiento que mostró mayor dureza en la cara transversal de la muestra fue el Alpha Plus + 420, luego la dureza del Alpha Plus fue prácticamente igual, por último, la dureza del Metco 8222 + 420 fue inferior de forma significativa a la dureza de los dos

recubrimientos anteriores, esto se observa también en la Tabla 4.5. La mayor dureza de éstos recubrimientos con respecto al Metco 8222 puede ser debida a la presencia de partículas de boro, que tienen como finalidad aumentar la dureza, y por lo tanto contribuyen a aumentar la resistencia al desgaste (Saeed, 2012).

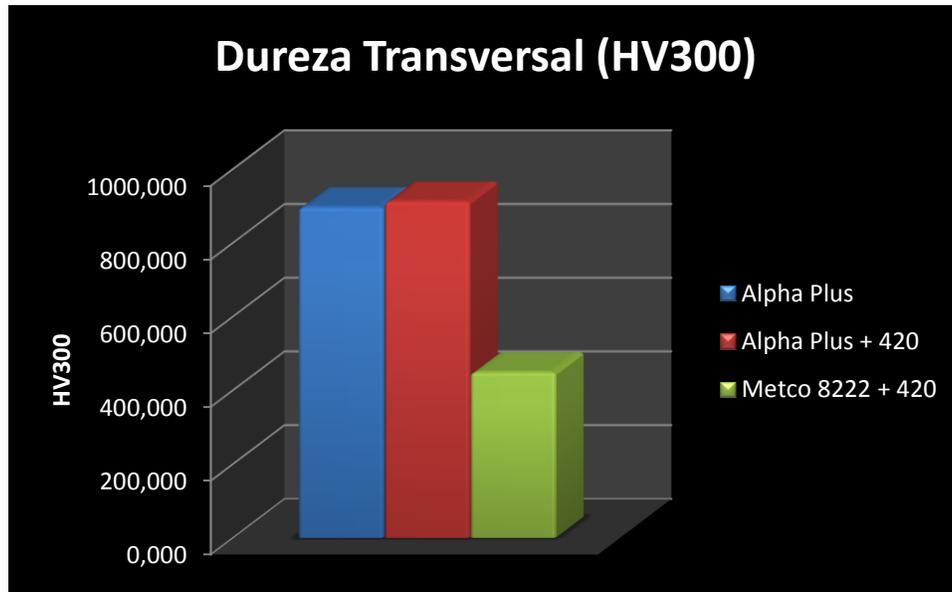


Figura 4.14 Dureza en la sección transversal de las probetas.

Recubrimiento	Dureza promedio (HV300)	Desviación	Comparación Relativa	Comparación Porcentual [%]
Alpha Plus	896,008	277,169	1,998	99,786
Alpha Plus + 420	911,708	339,245	2,033	103,287
Metco 8222 + 420	448,483	191,074	1,000	

Tabla 4.5 Comparación de la dureza en la sección transversal.

En cuanto a la dureza superficial, como se detalla de la figura 4.15 y tabla 4.6, los resultados fueron cualitativamente similares a los obtenidos en los ensayos de dureza transversal. El Alpha Plus y Alpha Plus + 420 mostraron una

dureza semejante, mientras que el Metco 8222 + 420 arrojó una dureza comparativamente inferior a ellos, con un valor de dureza cercano a la mitad del alcanzado por los otros.

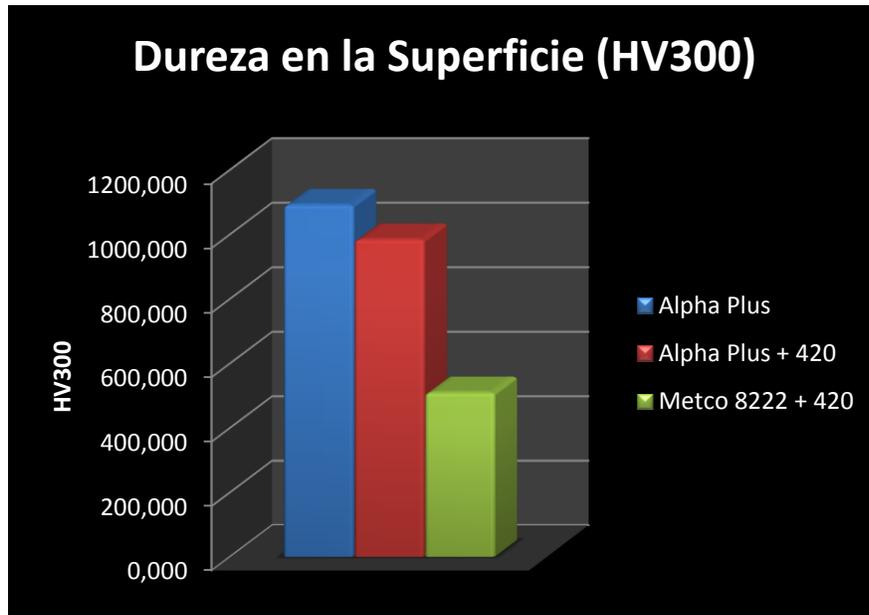


Figura 4.15 Dureza en la superficie de las probetas.

Recubrimiento	Dureza promedio (HV)	Desviación	Comparación Relativa	Comparación Porcentual [%]
Alpha Plus	1091,644	166,461	2,141	114,095
Alpha Plus + 420	984,422	241,402	1,931	93,066
Metco 8222 + 420	509,889	262,578	1,000	

Tabla 4.6 Comparación de la dureza superficial.

Durante los ensayos de dureza, se verificó un comportamiento anisotrópico de los tres recubrimientos ya que la dureza varió considerablemente en los distintos puntos de medición, como lo demuestra la desviación estándar de las tablas 4.5 y 4.6. Esto es debido a que los "splats" impactan a distintas temperaturas formando lamelas, con tamaños y morfologías distintas adoptando

propiedades ligeramente diferentes. Guzman y Pardi (2011) observaron este resultado en los ensayos de dureza realizados en su investigación.

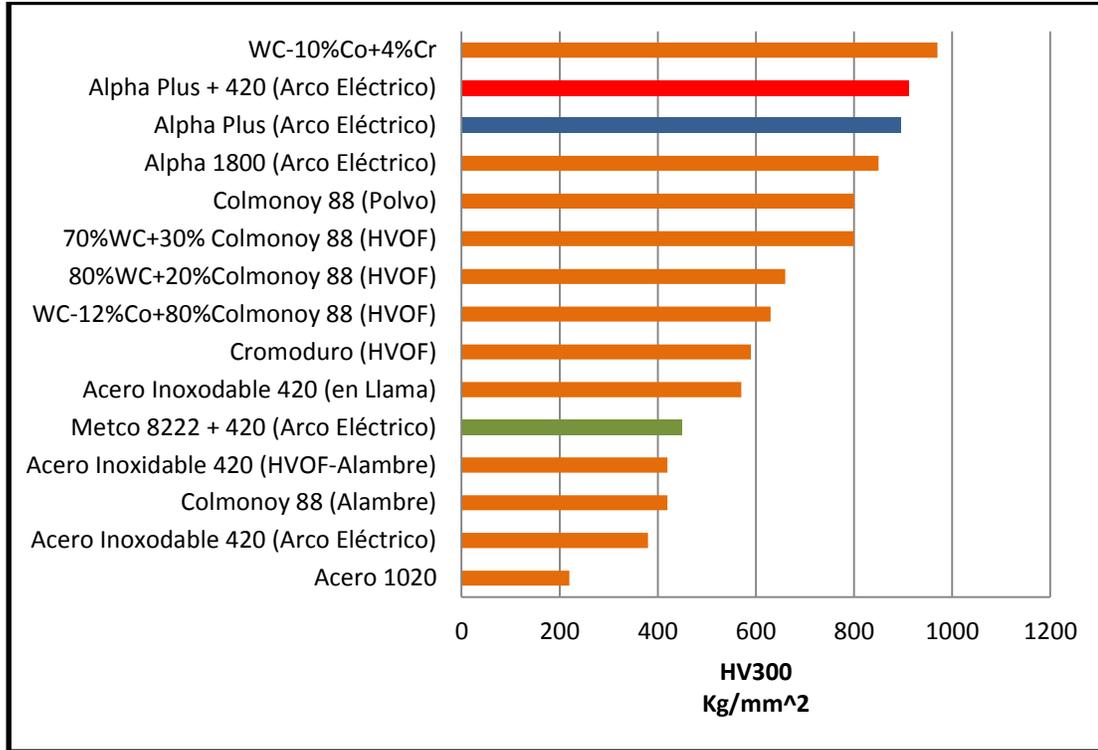


Figura 4.16 Comparación de dureza transversal de distintos recubrimientos.

Fuente: Cermeño (2006) y Autores.

En la figura 4.16 (Cermeño, 2006), se advierten las diferencias de durezas en la cara transversal entre distintos recubrimientos. El Alpha Plus + 420 y el Alpha Plus tienen unos valores de dureza elevados al compararse con otros recubrimientos, incluso con los aplicados por HVOF, esta elevada dureza es debida a la presencia de inclusiones de boro mencionadas anteriormente y que contribuyen a aumentar notablemente la dureza. Estos dos recubrimientos son solo superados por el recubrimiento WC-10%Co+4%Cr. Mientras que el Metco 8222 + 420, mostró ser inferior en dureza a la mayoría de los recubrimientos con los cuales se comparó.

4.4. Análisis del ensayo de Abrasión.

Los ensayos de abrasión realizados utilizando el procedimiento A de la norma ASTM G-65, que es el más severo de todos, ocasionaron que en el recubrimiento Metco 8222 + 420 se alcanzará el sustrato. Por lo que se utilizó el procedimiento B de la referida norma, el cual es el segundo más severo, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

Recubrimiento	Volumen perdido [mm³]	Desviación	Tiempo [m]
Alpha Plus	14,075	0,820	10
Alpha Plus + 420	20,152	2,414	10
Metco 8222 + 420	54,194	7,099	10

Tabla 4.7 Resultados de Ensayo Abrasión, Carga: 30,35 N.

Recubrimiento	Volumen perdido [mm³]	Desviación	Tiempo [m]
Alpha Plus	30,027	1,520	10
Alpha Plus + 420	32,056	2,414	10
Metco 8222 + 420	137,625	4,314	10

Tabla 4.8 Resultados de Ensayo Abrasión, Carga: 101,55 N.

Recubrimiento	Volumen perdido [mm³]	Desviación	Tiempo [m]
Alpha Plus	46,239	1,357	10
Alpha Plus + 420	63,890	11,975	10
Metco 8222 + 420	176,147	27,088	10

Tabla 4.9 Resultados de Ensayo Abrasión bajo Norma G65-B, Carga: 130 N.

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan los resultados de los ensayos de abrasión, donde se muestra la pérdida volumétrica y la desviación estándar para las tres condiciones de cargas utilizadas en los ensayos. El recubrimiento Alpha Plus, mostró la menor pérdida de volumen en las tres condiciones de carga. También se observó una mayor desviación estándar en los recubrimientos Alpha Plus + 420 y Metco 8222 + 420 en comparación al Alpha Plus, esto puede ser debido a la naturaleza de los recubrimientos, puesto que ellos son mezclas de dos recubrimientos, lo que ocasiona una estructura más heterogénea que la del Alpha Plus, y en consecuencia cada probeta de estos recubrimientos mezclados muestra un comportamiento ligeramente distinto ante el desgaste abrasivo.

En la figura 4.17 se distingue, de igual forma que en la tabla ,que el Alpha Plus presenta la menor pérdida volumétrica de los tres, luego se encuentra el Alpha Plus + 420 y finalmente el Metco 8222 + 420, esto se cumple de la misma forma para las tres condiciones de carga.. Este comportamiento es esperado debido a los resultados de los ensayos de dureza, ya que se ha observado que generalmente la resistencia a la abrasión es proporcional a la dureza, por lo tanto materiales más duros tienden a mostrar una mayor resistencia al desgaste abrasivo (Estévez, 2003).

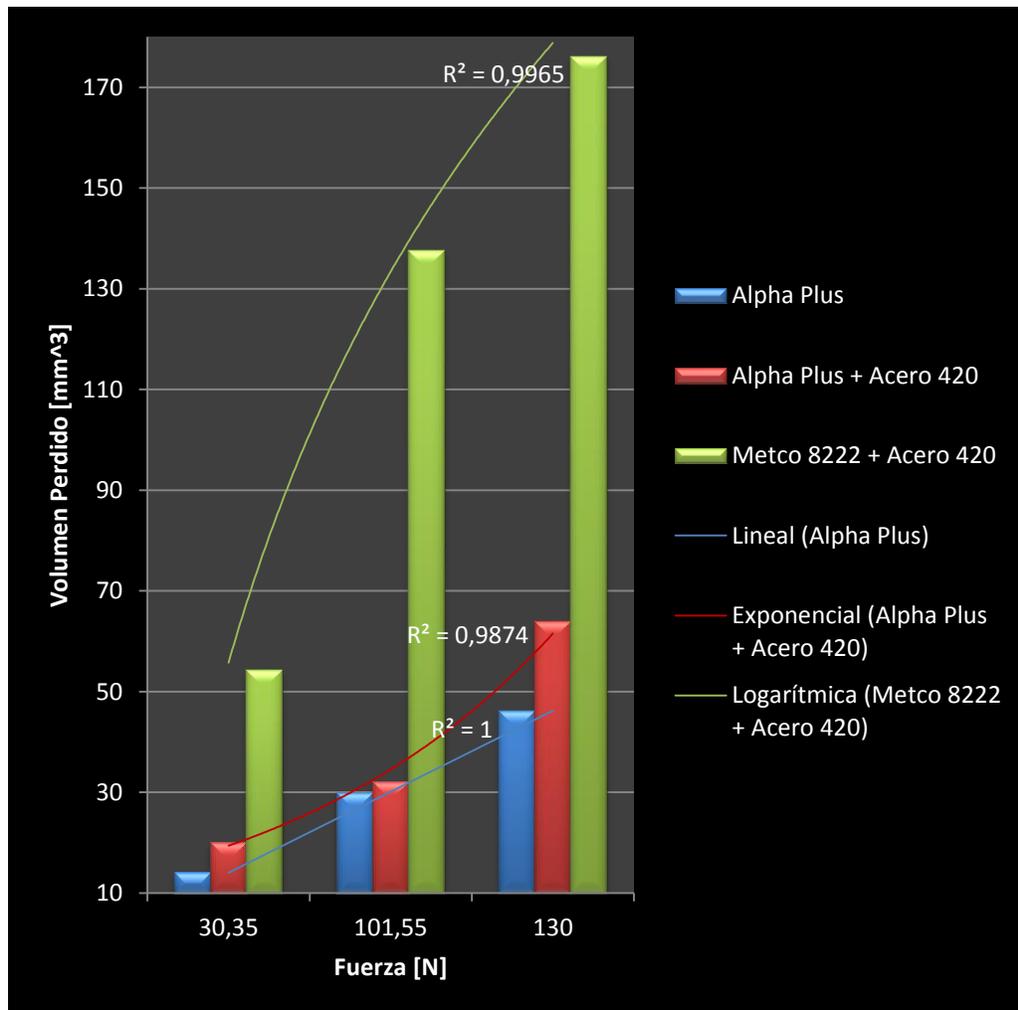


Figura 4.17 Comparación de pérdida volumétrica en las tres cargas.

De igual forma, se evidenció que la pérdida de material durante el desgaste por abrasión es proporcional a la carga, como afirma en su investigación Castillo (2011), aunque la relación de pérdida de volumen vs carga no fue igual para los tres recubrimientos. El Alpha Plus mostró un comportamiento lineal, mientras que el Alpha Plus + 420 se comportó de manera exponencial, y el Metco 8222+420 mostró una tendencia logarítmica. Esto se puede explicar por las diferencias existentes en la macroestructura, composición química y dureza de cada recubrimiento e incluso también en los mecanismos de desgaste que podrían estar actuando diferente para cada recubrimiento durante la abrasión, como se

observa en el caso del Alpha Plus + 420 y el Metco 8222 + 420 que magnificaron el desgaste con el aumento de la carga a diferencia del Alpha Plus que se comportó linealmente. La presencia del acero inoxidable 420 en los recubrimientos Alpha Plus + 420 y Metco 8222 + 420, influye negativamente en la resistencia a la abrasión por cuanto este material no posee una alta resistencia al desgaste, pero su existencia puede ser una ventaja al momento de mecanizar las piezas termorociadas, ya que aumentan la ductilidad, y por lo tanto la maquinabilidad.

En la tabla 4.10, 4.11 y 4.12, se puede observar la comparación relativa y porcentual de los tres recubrimientos a la carga de 31,35 N; 101,55 N y 130 N, respectivamente. Se comparó la resistencia a la abrasión del mejor recubrimiento, Alpha Plus, contra los otros dos.

Recubrimiento	Volumen Perdido [mm³]	Comparación relativa	Comparación porcentual [%]
Alpha Plus	14,075	1,000	-
Alpha Plus + 420	20,152	1,432	43,169
Metco 8222 +420	54,194	3,850	285,026

Tabla 4.10 Comparación pérdida volumétrica a 31.35 N.

Recubrimiento	Volumen Perdido [mm³]	Comparación relativa	Comparación porcentual [%]
Alpha Plus	30,027	1,000	-
Alpha Plus + 420	32,056	1,068	6,758
Metco 8222 +420	137,625	4,583	358,343

Tabla 4.11 Comparación pérdida volumétrica a 101.55 N

Recubrimiento	Volumen Perdido [mm³]	Comparación relativa	Comparación porcentual [%]
Alpha Plus	46,239	1,000	-
Alpha Plus + 420	63,890	1,382	38,173
Metco 8222 +420	176,147	3,809	280,947

Tabla 4.12 Comparación pérdida volumétrica a 130 N.

Como se puede detallar en la tabla 4.10 bajo una carga de 31,55 N, el Alpha plus presentó una resistencia a la abrasión 1,43 veces superior al Alpha Plus + 420 y 3,85 veces mayor al Metco 8222 + 420. Bajo la carga de 101,55 N, Tabla 4.11, el Alpha Plus fue superior 1,068 veces que el Alpha Plus + 420, y 4,583 veces al Metco 8222 + 420. En cuanto a la resistencia abrasiva a 130 N, Tabla 4.12, el Alpha Plus fue 1.382 veces mejor que el Alpha Plus + 420, y 3.89 veces superior al Metco 8222 + 420. Otra de las razones por las que el Metco 8222 + 420 sufrió un desgaste muy elevado en comparación con los otros dos recubrimientos, se debe a que el agente abrasivo (arena de sílice) utilizado en los ensayos de abrasión tiene una dureza (840 HV) significativamente superior a éste (448, 5 HV), lo que magnifica el desgaste abrasivo superficial, a esta conclusión llegó Suarez et al (2007) en su investigación.

En la figura 4.18, se compara la resistencia a la abrasión de distintos recubrimientos, para un tiempo de 10 minutos y carga de 130 N, Norma ASTM G65-B.

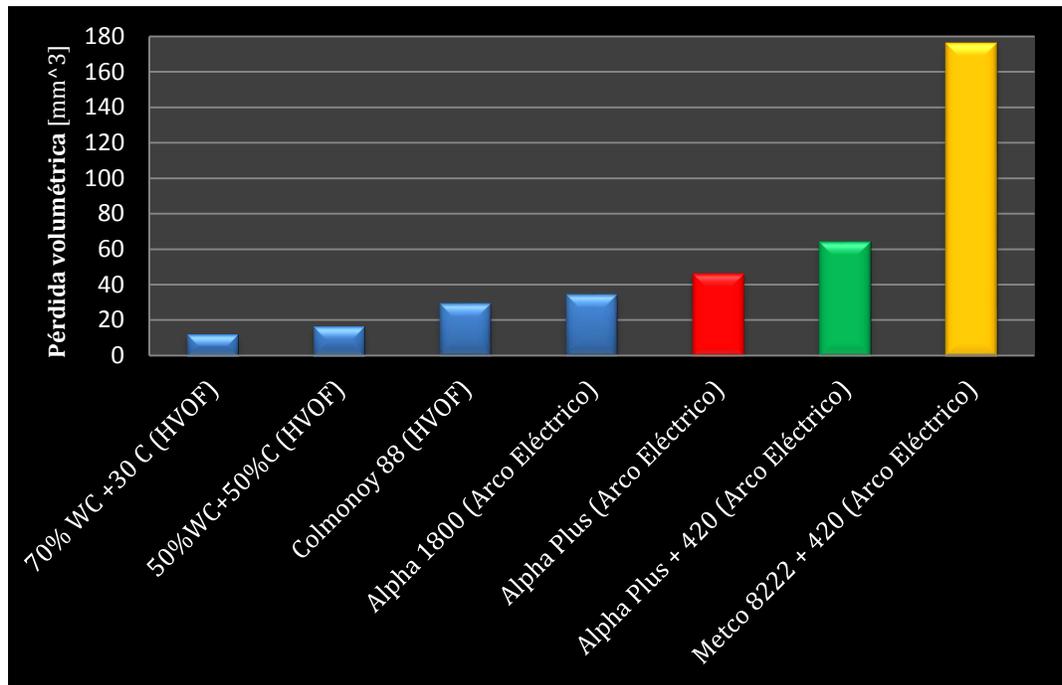


Figura 4.18 Comparación de la resistencia a la abrasión de distintos recubrimientos, ASTM G 65-B.

Se percibe entonces que el Alpha Plus y el Alpha Plus + 420, presenta un rendimiento inferior con respecto a los recubrimientos aplicados por HVOF, lo cual es de esperarse ya que generalmente los recubrimientos aplicados por esa técnica presenta una mejor resistencia al desgaste (Cermeño, 2010), por cuanto son más compactos, homogéneos, y con menor porcentaje de porosidades. En cuanto a la comparación con el Alpha 1800, aplicado por arco eléctrico, el rendimiento también es inferior pero con valores parecidos de pérdida volumétrica. El Metco 8222 + 420, presentó el peor rendimiento de todos los recubrimientos comparados, esto se debe a las razones anteriormente expuestas.

4.5. Microscopía electrónica de barrido.

Las siguientes figuras muestran las huellas de desgaste de los tres recubrimientos ensayados, bajo la Norma ASTM G-65B.

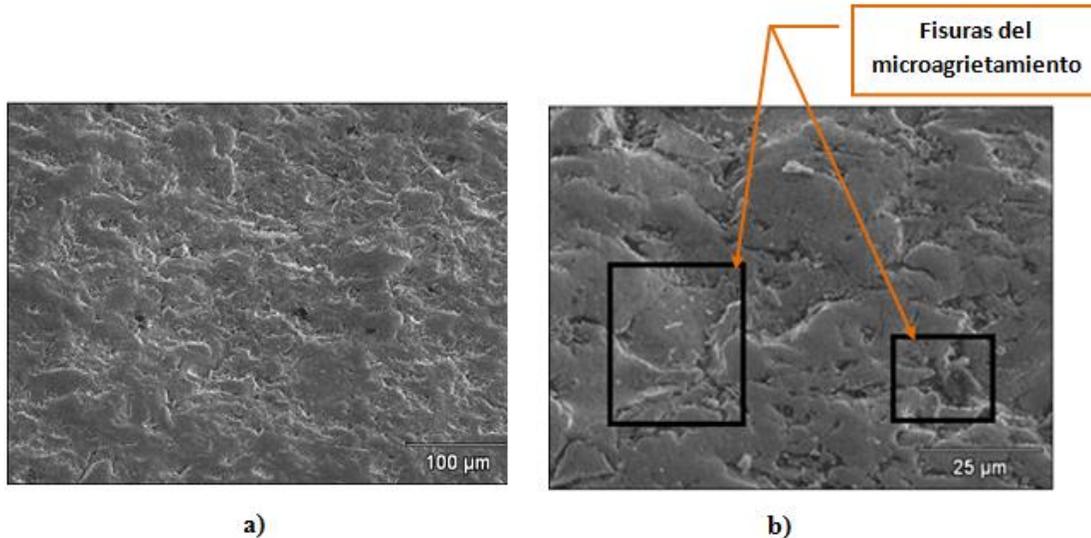


Figura 4.19 Probeta Alpha Plus. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella de desgaste a 500 X.

En la figura 4.19a, correspondiente al centro de la huella de desgaste del Alpha Plus, se puede observar que el mecanismo de desgaste predominante es el desprendimiento de partículas de la matriz, llamado microagrietamiento, que se presenta generalmente en materiales frágiles. Éste causa que las fases duras queden expuestas permitiendo ser removidas posteriormente por acción del abrasivo, resultados similares fueron encontrados por Rodríguez et al (2009). En la figura 4.19b, se aprecia con mayor detalle las fisuras características de este tipo de desgaste que se producen en las zonas de menor cohesión del recubrimiento, y traen como consecuencia el desprendimiento de material.

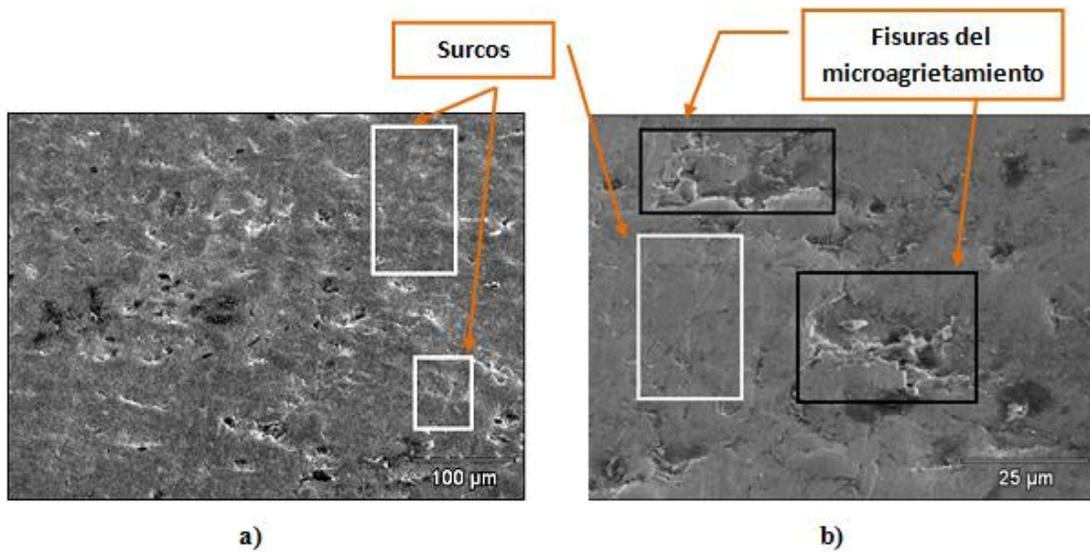


Figura 4.20 Alpha Plus + 420. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella desgaste a 500 X.

En las figuras 4.20a y 4.20b correspondientes al Alpha Plus + 420, se detalla áreas con surcos, en dirección acorde al sentido de giro del disco de goma de la máquina de abrasión, éstos son característicos del microarado, y son debidos a la deformación plástica ocasionada por las partículas abrasivas que actúan sobre las probetas. Estos surcos son barridos posteriormente por nuevas partículas abrasivas que actúan sobre ellos, lo que conlleva la pérdida de material, resultados similares fueron observados por Guzmán & Pardi (2011).

La figura 4.20b, corresponde al centro de la huella de desgaste del Alpha Plus + 420 a 500x, en ella se puede observar las zonas de acción del microagrietamiento y se evidencia el desprendimiento de material en las zonas de menor cohesión por acción de la arena abrasiva en las zonas señaladas.

La acción de estos dos mecanismos de desgaste trae como consecuencia que este recubrimiento presente una mayor pérdida volumétrica en comparación con el Alpha Plus. El microarado se presenta generalmente en materiales dúctiles,

en este caso se explica por la presencia de acero inoxidable en la composición del recubrimiento.

Las figuras 4.21a y 4.22b, se refieren al Metco 8222 + 420.

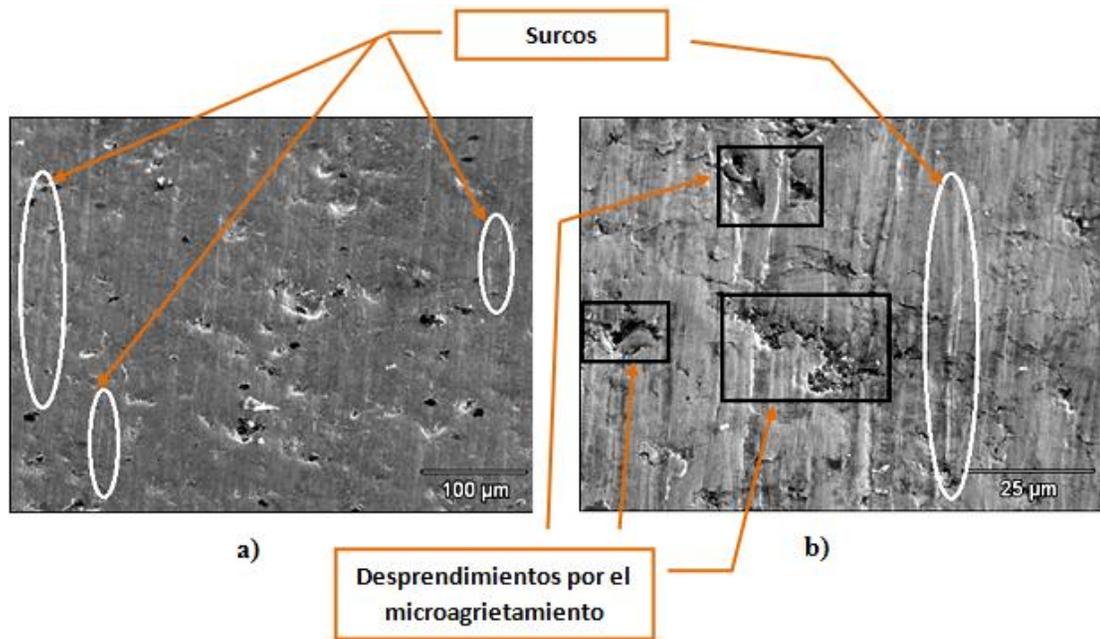


Figura 4.21 Metco 8222+420. a) Centro de huella de desgaste a 100 X. b) Centro de huella de desgaste a 500 X.

En la huella de desgaste de este recubrimiento también se advierte los mecanismos de microagrietamiento y microarado. Aunque en este recubrimiento, la acción de ellos fue mayor en comparación al Alpha Plus + 420, por cuanto se observa que los surcos se presentan en mayor cantidad y con mayor hondura (óvalos blancos en Figura 4.21a), y las zonas de desprendimiento son mayores y más profundas (rectángulos negros en Figura 4.21b), debido principalmente a la menor dureza del recubrimiento en comparación a los otros dos. Lo anterior explica porque este recubrimiento presenta el mayor desgaste a la abrasión de los tres estudiados.

En la figura 4.22, se logra observar la comparación de las huellas de desgaste de los tres recubrimientos ensayados.

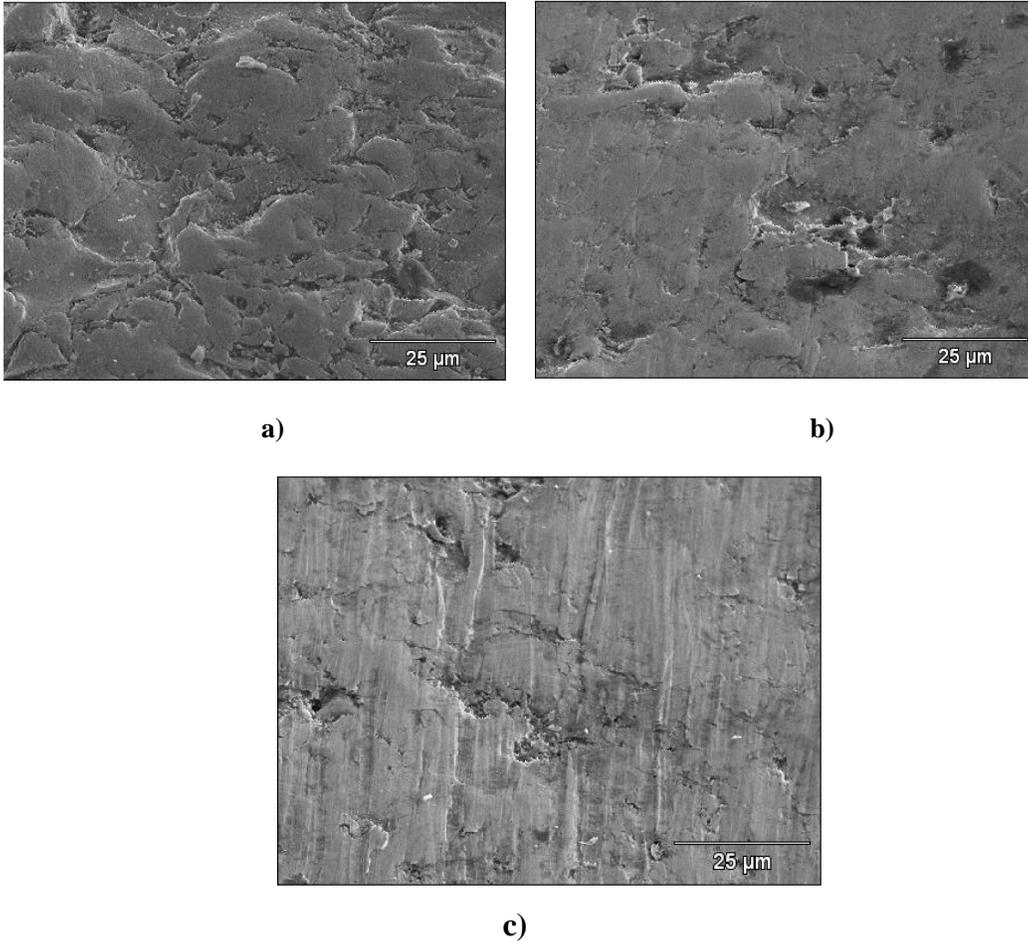


Figura 4.22 Comparación de las tres huellas de desgaste. Centro de la huella de desgaste a 500x. a) Alpha Plus, b) Alpha Plus + 420, c) Metco 8222 + 420.

En ellas se puede ver como el Alpha Plus, que mostró la menor tasa de desgaste a la abrasión, presenta principalmente el mecanismo de desgaste de microagrietamiento, quedando expuestas las fases duras, más resistentes a la abrasión. En cambio, en los otros dos recubrimientos se aprecia cómo actúa el surcado y el microagrietamiento, en ellas se observan que las áreas de

desprendimiento de material son mayores y más profundas que en el Alpha Plus. El Alpha Plus + 420 a pesar de mostrar una dureza similar a la del Alpha Plus, se ve perjudicado por la presencia del acero inoxidable 420 que posee una resistencia inferior al desgaste. Por otro lado, los surcos provocados por la arena son más abundantes y profundos en el Metco 8222 + 420, en comparación con el Alpha Plus + 420, esto es debido principalmente a su baja dureza y la falta de boro en su composición química.

Otros mecanismos de desgaste, tales como el erosivo, micro oscilatorio (“Fretting”), químico y algunas variaciones de la adhesión, no se presentaron en las muestras ensayadas de ninguno de los tres recubrimientos.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

Después de evaluar, analizar y comparar los resultados obtenidos de los distintos ensayos efectuados sobre los tres recubrimientos en estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

- Se determinó que ante el desgaste abrasivo bajo la norma ASTM G65-B, el recubrimiento Alpha Plus arrojó una pérdida volumétrica de 46,2 mm³. El mecanismo principal de desgaste observado ante la abrasión fue el microagrietamiento, o desprendimiento de fragmentos de la matriz.
- El recubrimiento Alpha Plus + acero inoxidable 420, ensayado bajo la norma ASTM G65-B, mostró una pérdida volumétrica de 63,9 mm³. Los principales mecanismos de desgaste durante el ensayo de abrasión fueron el surcado y microagrietamiento.
- El recubrimiento Metco 8222 + Acero Inoxidable 420, presentó ante el ensayo de abrasión ASTM G65-B una pérdida volumétrica de 176,15 mm³. Los principales mecanismos de desgaste durante el ensayo de abrasión fueron el surcado y microagrietamiento.
- Al comparar los tres recubrimientos se estableció que el recubrimiento con mayor resistencia al desgaste fue el Alpha Plus, ya que fue 1,38 veces superior al Alpha Plus + acero inoxidable 420 y 3,81 veces superior al Metco 8222 + Acero Inoxidable 420, bajo el ensayo ASTM G65-B.
- La evaluación de la dureza transversal arrojó que el Alpha Plus posee una dureza de 896,01 HV, el Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 mostró una

dureza de 911,71 HV y el Metco 8222 + Acero Inoxidable 420 posee una dureza de 448,48 HV.

- Al determinar la dureza superficial, el Alpha Plus mostró una dureza de 1091,64 HV, el Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 mostró una dureza de 984,62 HV y el Metco 8222 + Acero Inoxidable 420 posee una dureza de 509,89 HV.
- La mayor dureza de los recubrimientos Alpha Plus y Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 sobre el Metco 8222 + Acero Inoxidable 420, es debida a la presencia de partículas de boro en esos dos recubrimientos.
- Los tres recubrimientos mostraron una buena adhesión al sustrato y una estructura cohesionada y heterogénea.
- Durante el estudio se observó una relación entre la dureza de los recubrimientos y la resistencia ante el desgaste abrasivo.
- Los resultados de los ensayos realizados, permitieron verificar la proporcionalidad entre la carga y la pérdida volumétrica en los ensayos de abrasión.
- Los valores de volumen de desgaste obtenidos indica que los ensayos de abrasión para el Alpha Plus, Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 e incluso aun el Metco 8222 + Acero Inoxidable 420 se mantuvieron dentro de un régimen de desgaste severo.
- Se puede concluir que los recubrimientos aquí estudiados depositados por arco eléctrico presentan buenas propiedades de resistencia a la abrasión y especialmente para el caso del Alpha Plus y Alpha Plus + Acero

Inoxidable 420 los resultados fueron significativamente altos como para conservar poca diferencia por debajo de los mejores recubrimientos incluso termorociados por HVOF reportados en la literatura consultada.

- Se sugiere la utilización de recubrimientos de Alpha Plus y Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 termorociados por arco eléctrico para las aplicaciones que comprendan desgaste abrasivo severo en la industria, pudiéndose utilizar Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 que sacrifica un mínimo de resistencia comparado con Alpha Plus puro pero gana así maquinabilidad que compensara en un ahorro de material en los procesos de rectificado y de alambre Alpha Plus.

5.2. Recomendaciones.

- Se recomienda la utilización de recubrimientos de Alpha Plus y Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 termorociados por arco eléctrico para las aplicaciones que comprendan desgaste abrasivo severo en la industria, pudiéndose utilizar Alpha Plus + Acero Inoxidable 420 para sacrificar un mínimo de resistencia comparado con Alpha Plus puro y ganar así maquinabilidad que compensara en un ahorro de material en los procesos de rectificado así como también ahorro de material de alambre de Alpha Plus.
- Realizar un tratamiento térmico por flama al recubrimiento Metco 8222 mezclado con el Acero Inoxidable 420, puede mejorar la resistencia a la abrasión y al desgaste en general. Esto igualmente aplica para el Alpha Plus mezclado con el Acero Inoxidable 420.
- Realizar estudios posteriores con ensayos de desgaste por erosión y por deslizamiento de los tres recubrimientos estudiados en este trabajo para evaluar su comportamiento ante estos tipos de desgastes.
- Evitar en lo posible la oxidación de las muestras antes, durante y después de la realización de los ensayos para evitar y disminuir errores o interferencias en los resultados.
- Reparar la fresa de control numérico de la escuela de Ingeniería Mecánica para de esta forma facilitar los procesos de rectificadores necesarios previos a los ensayos de desgastes.

- Utilizar máscaras anti-polvo adecuadas al momento de realizar los ensayos de abrasión, con el fin de prevenir problemas de salud ocasionados por la arena de sílice.
- Buscar en la mejor medida posible laboratorios que cuenten con equipos de espectrometría modernos capaces de realizar análisis químico que permita la detección y cuantificación del boro y carbono adecuadamente presentes en la composición química de los recubrimientos.
- Realizar estudios posteriores de desgaste abrasivo para el Metco 8222 aplicado de manera pura (sin mezclar) igualmente termorociado por arco eléctrico para comprobar su resistencia a la abrasión y maquinabilidad real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, P., & Castro, M. (2013). Evaluación del desgaste por deslizamiento y del desgaste por abrasión de un recubrimiento Stellite 6 aplicado por plasma de arco transferido. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Arias, F. G. (2006). El Proyecto de Investigación - Guía para su elaboración. Caracas.

ASTM. (2001). G65-00. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand / rubber wheel apparatus.

ASTM. (2003). E 92-82. Standard test method for Vickers hardness of metallic materials.

Bilbao, C., & Moreno, I. (2002). Evaluación de la resistencia al desgaste de recubrimientos tipo Cermet depositados por HVOF con tratamiento térmico posterior. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Burgos C., H. L. (2002). Evaluación de recubrimientos de Babbitt depositados por Arco-Eléctrico utilizados en cojinetes de turbinas. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Castillo, R. (s.f.). Ingeniería de superficies: tecnologías y aplicaciones. Revisión Técnica, Xalapa Enríquez, México.

Cermeño, J., & Ruiz, J. (2006). Estudio de la resistencia al desgaste de un recubrimiento base hierro depositado por el proceso de rociado térmico por el

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

acero AISI 1020. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Dallaire, S. (2000). Hard Arc-Sprayed Coating with Enhanced Erosion and Abrasion Wear Resistance. Industrial Materials Institute, 75 De Mortagne, Boucherville, P.Québec, Canada.

Ernest, J., & Faublack, A. (2012). Efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas de depósitos sintetizados por la proyección térmica con plasma de aleaciones metálicas utilizados en reconstrucción de componentes mecánicos. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Estévez B., D. A., & González M., L. (2003). Estudio de la Resistencia al Desgaste de Recubrimientos Depositados por Rociado térmico de Alta Velocidad y por Electrodeposición. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Eyre, T. (1978). Wear characteristics of metals. American Society for Metals. U.S.A.: Rigney, D.

Guilemany et al. (2004). Tribología de recubrimientos Cermet/NiCrBSi depositados mediante HVOF. botetín de la sociedad española de ceramica y vidrio, 11.

Guzmán, M., & Pardi, S. (2011). Influencia de los parámetros de rociado sobre las propiedades de recubrimientos depositados por rociado térmico (HVOF) utilizando polvos WC12%Co nanoestructurados. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Navas Guzmán, M. (2007). Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España.

Porras M., H. R. (2007). Termorociado en frío para mantenimiento correctivo y preventivo de piezas sometidas a desgastes. Universidad de San Carlos de Guatemala, Colonia Santa Rosa, Guatemala.

Rodriguez et al. (2009). Desgaste de recubrimientos WC-Co-NiCrBSi tratados térmicamente. Paper, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Saeed et al. (2012.). Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel. Central Metallurgical Research & Development Institute, Cairo, Egipto.

Shigley et al. (2004). Mechanical Engineering Design (7ma ed.). McGraw-Hill.

Smith, W., & Fast, D. (1991). The future of thermal spray technology. Welding Journal, 47, 56-65.

Suárez el al. (2007). Influencia de la relación de durezas entre material y abrasivo en ensayos de abrasión. Universidad Tecnológica Nacional , Buenos Aires, Argentina.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Desgaste Adhesivo. (s.f.). Recuperado el 27 de 05 de 2013, de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Desgaste_adhesivo.jpg.

Desgaste Micro-oscilatorio. (s.f.). Recuperado el 27 de 05 de 2013, de <http://www.geocities.ws/electodes/fretting.htm>.

Erosion. (s.f.). Recuperado el 27 de 05 de 2013, de <http://www.geocities.ws/electodes/erosion.htm>.

Gómez, J. (2009). Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica mediante espectroscopía de impedancia electroquímica. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid. Obtenido de <http://tecnoatocha.wordpress.com/tecnicas-de-proyeccion/>.

Graco. (s.f.). PROTECTIVE COATING EQUIPMENT. Recuperado el 15 de Julio de 2013, de <http://www.graco.com/content/dam/graco/aftd/literature/catalogs/303253EN-A/303253EN-A.pdf>

Marcelo, P. (2006). Recubrimientos por thermal spray. Recuperado el 26 de 05 de 2014, de http://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Pagnola/publication/220034335_RECUBRIMIENTOS_POR_THERMAL_SPRAY/file/d922b4f47aaf4f1229.pdf

METALOGENIA S.A. (s.f.). Distintos mecanismos de abrasión en la interacción de los aceros MTG Steels con el terreno. Recuperado el 27 de 05 de 2013, de <http://www.mtg.es/es/producto.php?mid=4>.

Newbery, A., & Grant, P. (2006). Oxidation during electric arc spray forming of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 259-269. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606003359>.

Plasmatec Ingenieros C.A. (s.f.). Procesos de Rociado Térmico por Combustión. Recuperado el 27 de 05 de 2014, de http://plasmatec.com.ve/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=25.

Sulzer Metco. (2013). Material Product Data Sheet. Iron-Based, High Chromium (Cr > 20%) Thermal Spray Wires. Recuperado el 26 de 05 de 2014, de http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Materials/Thermal_Spray/ProductInformation/Wires_Iron_Base/DSMTS_0008_3_Fe_High_Cr_Wire.pdf

Sulzer Metco. (2013). Soluciones de proyección de alambre. Recuperado el 27 de 05 de 2014, de http://www.sulzer.com/es/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Equipment/Thermal_Spray/Brochures/Arc_Solutions_V4.pdf

Sumindu S.A. (s.f.). Especificación Técnica del Material AISI 420. Recuperado el 27 de 05 de 2014, de <http://www.sumindu.com/especificaciones/26-%20420.pdf>

Synthesarc Inc. (s.f.). ALPHA PLUS-3 ARC-SPRAYED COATINGS. Recuperado el 15 de 07 de 2013, de

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

<http://www.synthesarc.com/Uploads/Documents/Alpha-Plus-3-Arc-Sprayed-Coating.pdf>

Torres A., E. (2012). Introducción al estudio de los mecanismos de desgaste mecánicos. Recuperado el 26 de 05 de 2014, de <http://monografias.umcc.cu/monos/2012/Facultad%20de%20Ingenierias/mo12116.pdf>.

Universidad Tecnológica de Pereira. (s.f.). Desgaste de Materiales. Recuperado el 27 de 05 de 2013, de <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>.

Wall Colmonoy Corporation. (2008). Colmonoy technical data sheet. Recuperado el 20 de Julio de 2013, de Wear-resistant products and services: www.wallcolmonoy.com

ANEXOS



CALIDAD
AISI 420
ACERO
INOXIDABLE

Color de Identificación:
Morado / Blanco

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL MATERIAL

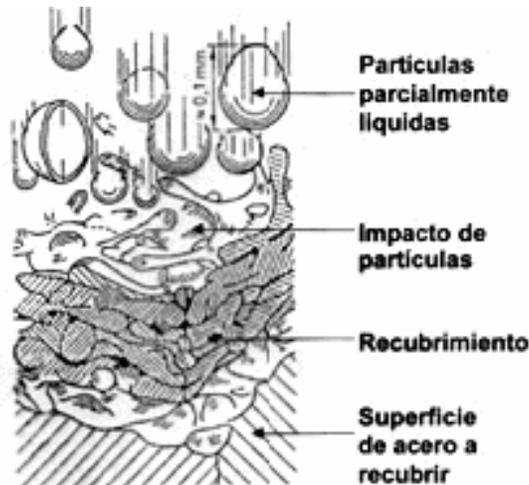
NORMAS EQUIVALENTES	
AFNOR (Fr)	Z20C13
BS (Ingl)	420 S37
DIN (Alem)	14021
JIS (Jap)	SUS 420 J1
UNI (Ital)	X20Cr13
Grado Thyssen	Remanit 4021

RANGOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA				
CARBONO	AZUFRE	FÓSFORO	SILICIO	MANGANESO
C ≥ 0.15	S 0.03 (Máx)	P 0.04 (Max)	Si ≤ 1.00	Mn ≤ 1.00
CROMO	NIQUEL	MOLIBDENO	VANADIO	TUNGSTENO
Cr 12.00 - 14.00	Ni —	Mo —	V —	W —

A 1 Acero AISI 420.

	Nominal Composition	Weight Percent (nominal)										
		Fe	Al	B	Cu	Cr	C	Mn	Mo	Ni	Si	Other (max)
Metco 8236	Fe 25Cr 5Al 0.25C 0.25Si	Bal.	5.0	---	---	25.0	0.25	---	---	---	0.25	NR
Metco X10	Fe 35Ni 20Cr 2Si	Bal.	---	---	---	20.0	---	---	---	35.0	2.0	NR
Metco X28	Fe 31Ni 27Cr 4Mo 1.75Mn 1.1Cu	Bal.	---	---	1.1	27.0	---	1.75	4.0	31.0	---	NR
Metco 8222	Fe 28Cr 5C 1Mn	Bal.	---	---	---	28.0	5.0	1.0	---	---	---	1.5
Metco 8237	Fe 28Cr 5C 5B 0.6Si 0.3Mn	Bal.	---	5.0	---	28.0	5.0	0.3	---	---	0.6	2.0
Metco 8295	Fe 29Cr 4B 1.75Si	Bal.	---	4.0	---	29.0	---	---	---	---	1.75	1.5

A 2 Metco 8222



A 3 Formación de un recubrimiento aplicado por rociado térmico.

Alpha Plus										
Nomenclatura	Tiempo [min]	Fuerza sobre probeta [N]	Peso Antes [g]	Peso Después [g]	Masa Perdida [g]	Porcentaje Masa Perdida [%]	Volumen Perdido [mm ³]	Promedio Volumen Perdido [mm ³]	Volumen Corregido [mm ³]	Desviación Estándar
1.1	10	101,55	108,4829	108,2752	0,2077	0,191458746	30,566593			
1.2	10	101,55	107,5481	107,3463	0,2018	0,187636974	29,698308	29,291145	30,02671	1,5204807
1.3	10	101,55	108,8117	108,6241	0,1876	0,17240793	27,608536			
1.4	10	30,35	107,1148	107,0231	0,0917	0,085609085	13,495217			
1.5	10	30,35	108,2967	108,1972	0,0995	0,091877222	14,64312	13,730684	14,07549	0,820448
1.6	10	30,35	107,3242	107,2355	0,0887	0,082646784	13,053716			
1.10	10	130	109,7249	109,4195	0,3054	0,278332448	44,944812			
1.11	10	130	110,5222	110,2087	0,3135	0,28365342	46,136865	44,83689	46,23931	1,3571588
1.12	10	130	108,3052	108,0101	0,2951	0,272470759	43,428992			

Alpha Plus + 420										
Nomenclatura	Tiempo [min]	Fuerza sobre probeta [N]	Peso Antes [g]	Peso Después [g]	Masa Perdida [g]	Porcentaje Masa Perdida [%]	Volumen Perdido [mm ³]	Promedio Volumen Perdido [mm ³]	Volumen Corregido (mm ³)	Desviación estándar
2.1	10	101,55	109,8446	109,6023	0,2423	0,22058435	32,1689609			
2.2	10	101,55	108,6532	108,4316	0,2216	0,20395166	29,4207253	31,2705844	32,0558547	1,602245
2.8	10	101,55	112,24	111,9973	0,2427	0,21623307	32,2220669			
2.3	10	30,35	108,032	107,8642	0,1678	0,15532435	22,277968			
2.4	10	30,35	111,4501	111,3181	0,132	0,11843866	17,5249808	19,6580719	20,1517275	2,41359819
2.5	10	30,35	110,0565	109,9121	0,1444	0,13120534	19,1712669			
2.11	10	130	111,549	111,1444	0,4046	0,36271056	53,7167214			
2.12	10	130	107,7772	107,2065	0,5707	0,5295183	75,7689889	62,0455128	63,8901091	11,9750822
2.13	10	130	110,9216	110,4949	0,4267	0,38468612	56,650828			

Metco 8222 + 420										
Nomenclatura	Tiempo [min]	Fuerza sobre probeta [N]	Peso Antes [g]	Peso Después [g]	Masa Perdida [g]	Porcentaje Masa Perdida [%]	Volumen Perdido [mm ³]	Promedio Volumen Perdido [mm ³]	Volumen Corregido (mm ³)	Desviación Estándar
3.1	10	30,3549492	116,2328	115,9595	0,2733	0,23513156	45,698868			
3.3	10	30,3549492	109,8397	109,4815	0,3582	0,3261116	59,895113	52,8666616	54,1942549	7,0991484
3.4	10	30,3549492	110,4085	110,0915	0,317	0,28711558	53,006004			
3.5	10	101,547521	111,3346	110,506	0,8286	0,74424303	138,55134			
3.6	10	101,547521	113,5761	112,773	0,8031	0,70710299	134,28745	134,254009	137,62541	4,3141506
3.7	10	101,547521	110,2821	109,5051	0,777	0,70455677	129,92323			
3.11	10	130	111,6096	110,7687	0,8409	0,75342981	140,60804			
3.12	10	130	111,276	110,1454	1,1306	1,01603221	189,04918	171,831978	176,147041	27,088326
3.13	10	130	110,7534	109,642	1,1114	1,00349064	185,83872			

A 4 Cálculo de la pérdida volumétrica del ensayo de abrasión.

Alpha Plus	1	2	3	4
D1	60,7	23,8	22,6	24,5
D2	56,6	25,3	21	24,5
HV	161,7	923	1170,6	869,1
D1	22,4	25,2	23,1	23
D2	23,4	23,9	22	21,1
HV	1065,5	923	1094	1142,2
D1	25,7	25,2	22,6	26,2
D2	28	24,6	23	26,2
HV	771,7	897,3	1070,2	663,8
HV prom	896,008333			
Desviación	277,168575			

Alpha Plus + 420	1	2	3	4
D1	36,3	22,2	22,1	24,9
D2	27,8	20,6	21,4	24,7
HV	541,6	1214,8	1176	904,5
D1	22	21,5	32	23,4
D2	21,5	21,5	33,2	24,5
HV	1176	1203,5	523,5	969,9
D1	35,8	39,9	22,3	21
D2	29,7	42,4	22	21,2
HV	518,7	328,5	1133,9	1249,6
HV prom	911,708333			
Desviación	339,24497			

Metco 8222 + 420	1	2	3	4
D1	48	27,9	34,5	26,8
D2	44,4	27,4	34,5	26,4
HV	260,6	727,7	467,4	757,5
D1	33,2	41,8	42,6	77,5
D2	27,1	37,9	40,5	73,4
HV	612	350,3	322,2	97,7
D1	39,5	39	42,5	32,8
D2	32,1	29,3	37,4	32,2
HV	434,1	477	348,6	526,7
HV prom	448,483333			
Desviación	191,073507			

A 5 Dureza en la sección transversal.

Alpha Plus	1	2	3
D1	23,7	21,9	25,5
D2	23	22,8	24,9
HV	1024,4	1113,7	876
D1	21	21,6	27
D2	21,6	21,5	27,6
HV	1226,2	1197,9	774,6
D1	20,8	21,3	21,6
D2	21,5	22	21,8
HV	1243,7	1186,9	1181,4
HV prom	1091,64		
Desviación	166,46		

Alpha Plus + 420	1	2	3
D1	22,8	23,7	33,3
D2	21,9	23,6	31,6
HV	1113,7	994,6	528,3
D1	22	22,2	27,7
D2	22,4	22,2	25,9
HV	1128,8	1128,8	774,6
D1	20,9	21,8	27
D2	21	21,8	26,8
HV	1267,5	1154,7	768,8
HV prom	984,42		
Desviación	241,40		

Metco 8222 + 420.	1	2	3
D1	31,9	46	35,2
D2	32,9	45,1	37,4
HV	529,9	268,1	422,2
D1	22	27,2	39,4
D2	22,9	26,5	40,1
HV	1094	771,7	352,1
D1	37,1	36,3	39,6
D2	37,6	37,4	41
HV	398,8	409,7	342,5
HV prom	509,88		
Desviación	262,57		

A 6 Dureza en la sección superficial.